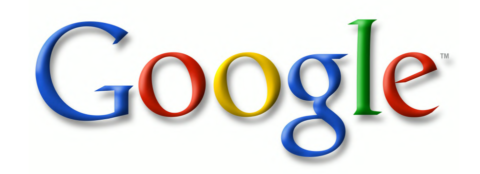
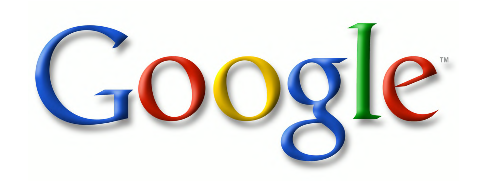



Google



BIBLIOTHÈQUE SCIENTIFIQUE CONTEMPORAINE

PHÉNOMÈNES
ÉLECTRIQUES
De l'Atmosphère

LIBRAIRIE J.-B. BAILLIÈRE ET FILS

Bibliothèque Scientifique Contemporaine

A 3 FR. 50 LE VOLUME

Nouvelle collection de volumes in-16, comprenant 300 à 400 pages, imprimés en caractères elzéviriens et illustrés de figures intercalées dans le texte.

LA SUGGESTION MENTALE et l'action des médicaments à distance, par MM. BOURRU et BUROT. 1 vol. in-16 avec figures. . . . . 3 fr. 50

LE SOMNAMBULISME PROVOQUÉ. Études physiologiques et psychologiques, par H. BEAUNIS, prof. à la Faculté de Nancy. 1 vol. in-16, fig. 2e *édit.* 3 fr. 50

MAGNÉTISME ET HYPNOTISME. Phénomènes observés pendant le sommeil nerveux, par le Dr A. CULLERRE 1 vol. in-16, 28 fig. 2e *édit.* . 3 fr. 50

NERVOSISME ET NÉVROSES. Hygiène des énervés et des névropathes, par le Dr A. CULLERRE. 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50

HYPNOTISME, DOUBLE CONSCIENCE ET ALTÉRATIONS DE LA PERSONNALITÉ, par le Dr AZAM, profess. à la Faculté de Bordeaux. 1 vol. in-16, avec fig. 3 fr. 50

LE CERVEAU ET L'ACTIVITÉ CÉRÉBRALE au point de vue psycho-physiologique, par ALEX. HERTZEN, prof. à l'Académie de Lausanne. 1 vol. in-16. 3 fr. 50

LES ANCÊTRES DE NOS ANIMAUX dans les temps géologiques, par Albert GAUDRY, prof. au Muséum, membre de l'Institut. 1 vol. in-16, avec fig. 3 fr. 50

LES PYGMÉES. Les Pygmées des anciens d'après la science moderne, les Négritos ou Pygmées asiatiques, les Négrilles ou Pygmées africains, les Hottentots et les Boschismans, par A. DE QUATREFAGES, professeur au Muséum, membre de l'Institut. 1 vol. in-16, avec figures. . . . . . 3 fr. 50

L'HOMME AVANT L'HISTOIRE, par CH. DEBIERRE, agrégé de la Faculté de Lyon. 1 vol. in-16, avec figures. . . . . 3 fr. 50

SOUS LES MERS. Campagnes d'explorations sous-marines, par le marquis de FOLIN, membre de la Commission des dragages. 1 vol. in-16, fig. 3 fr. 50

LE SECRET MÉDICAL. Honoraires, mariage, assurances sur la vie, déclaration de naissance, expertise, témoignage, etc., par P. BROUARDEL, professeur et doyen à la Faculté de Paris. 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50

MICROBES ET MALADIES, par J. SCHMITT, professeur agrégé à la Faculté de Nancy. 1 vol. in-16, avec 24 figures. . . . . 3 fr. 50

LA GALVANOPLASTIE, le nickelage, l'argenture, la dorure et l'électro-métallurgie, par E. BOUANT, agrégé des sciences. 1 vol. in-16, avec fig. 3 fr. 50

LA COLORATION DES VINS par les couleurs de la houille, méthode analytique et marche systématique pour reconnaître la nature de la coloration, par P. CAZENEUVE, profess. à la Faculté de Lyon. 1 vol. in-16, avec 1 pl. 3 fr. 50

LES ABEILLES. Organes et fonctions, éducation et produits, miel et cire, par MAURICE GIRARD, président de la Société entomologique de France. 1 vol. in-16, avec 30 figures et 1 planche coloriée. *Deuxième édition.* 3 fr. 50

LA PRÉVISION DU TEMPS et les prédictions météorologiques, par H. DALLET. 1 vol. in-16, avec 40 figures. . . . . 3 fr. 50

LE LAIT. Études chimiques et microbiologiques, par DUCLAUX, professeur à la Faculté des sciences de Paris. 1 vol. in-16, avec figures. . 3 fr. 50

LES TREMBLEMENTS DE TERRE, par FOUQUÉ, professeur au Collège de France, membre de l'Institut. 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50

L'ORIGINE DES ARBRES CULTIVÉS, par M. DE SAPORTA, correspondant de l'Institut de France. 1 vol. in-16, avec figures. . . . . . . 3 fr. 50

PHÉNOMÈNES

ÉLECTRIQUES

De l'Atmosphère

PAR

GASTON PLANTÉ

LAURÉAT DE L'INSTITUT (ACADÉMIE DES SCIENCES)

Avec figures intercalées dans le texte



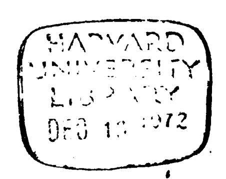
PARIS

LIBRAIRIE J.-B. BAILLIÈRE ET FILS

RUE HAUTEFEUILLE, 19, PRÈS DU BOULEVARD SAINT-GERMAIN

—

1888


HARVARD
UNIVERSITY
LIBRARY
DEC 13 1972

PRÉFACE

Arago écrivait dans sa *Notice sur le tonnerre :*

« Les éclairs en boule dont nous avons cité tant d'exemples et qui sont si remarquables, d'abord par la lenteur et l'incertitude de leurs mouvements, ensuite par l'étendue des dégâts qu'ils occasionnnent en éclatant, me paraissent aujourd'hui un des phénomènes les plus inexplicables de la physique.

« Ces boules, ces globes de feu, semblent des agglomérations de substances pondérables fortement imprégnées de la matière de la foudre. Comment se forment de telles agglomérations? Dans quelles régions sont-elles nées? D'où proviennent

les substances qui les composent? Quelle en est la nature? Pourquoi s'arrêtent-elles quelquefois pendant un temps assez long pour se précipiter ensuite avec une grande rapidité, etc., etc.? Devant toutes ces questions, la science reste muette[1]. »

« ... Il n'est qu'une circonstance dans laquelle le physicien ne sait pas engendrer ce que la nature produit avec tant de facilité; il ne sait pas donner naissance au tonnerre en boule; il ne sait pas produire ces agglomérations sphériques de matière, lesquelles se meuvent avec lenteur, sans perdre la propriété de fulminer les corps. Il y a, à ce sujet, dans la science, une lacune qu'il serait très important de combler[2]. »

En lisant, pour la première fois, ces lignes d'Arago, vers 1854, nous conçûmes le projet de chercher à imiter et à expliquer, s'il était possible, cette forme extraordinaire de la foudre. Mais comment y parvenir? Ne connaissant que les étincelles linéaires

1 Œuvres de François Arago, t. I, p. 219. Paris, 1854.
2 *Ibidem*, p. 396.

et sinueuses des machines électriques qui ne correspondent qu'à la forme en zigzag des éclairs ordinaires, comment concevoir la possibilité d'obtenir des étincelles en boule?

La question était posée; toutefois, dans les problèmes que la nature offre à nos méditations, il ne suffit pas qu'une question soit bien posée pour être à moitié résolue. C'est en vain qu'on donne libre carrière à l'imagination ; il faut nécessairement des faits nouveaux pour servir de termes de comparaison, lorsque rien dans les faits connus ne se rapproche du point que l'on voudrait éclaircir. D'un autre côté, ces faits nouveaux ne se révèlent pas aisément d'eux-mêmes dans le domaine où on souhaiterait les observer.

Aussi sommes-nous resté de longues années sans avoir aucune idée de la manière dont on pouvait résoudre le problème en question. Mais nous poursuivions des travaux sur d'autres sujets, et quand l'esprit s'est placé d'avance à un certain point de vue, il est naturellement porté à en rapprocher toutes les observations nouvelles qui se

présentent. D'ailleurs, par suite de l'unité qui règne dans la nature, au milieu d'une infinie variété d'effets, les phénomènes que l'on observe peuvent offrir souvent un lien quelconque ou un rapport inattendu avec ceux que l'on voudrait découvrir dans une voie différente.

C'est ce que nous a prouvé, une fois de plus, l'expérience. En cherchant la solution d'un autre problème, l'accumulation et la transformation de l'énergie de la pile voltaïque, nous parvînmes à avoir entre les mains une source d'électricité, réunissant à la fois la *quantité* et la *tension*, et pouvant donner, par conséquent, des effets différents de ceux des machines ordinaires de l'électricité statique.

Or, le premier phénomène qui se présenta pour nous à l'observation, vers 1875[1], en employant cette source puissante d'électricité, fut justement l'*agrégation globulaire* d'un liquide électrisé autour d'un conducteur servant à y amener le courant.

[1] Voir *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXX, p. 1133. 3 mai 1875.

C'était là un de ces *faits indicatifs*, comme les appelait Bacon, qui pouvaient entraîner d'importantes conséquences.

En augmentant, en effet, la *tension* de notre source, ce ne fut plus une boule liquide qui se produisit, mais un véritable *globule de feu*, et c'est ainsi que nous avons été conduit à l'imitation, par suite, à l'explication des divers phénomènes qui accompagnent l'apparition de la *foudre globulaire*.

Les autres effets que nous avons observés, avec des courants électriques de haute tension, nous ont offert, comme par surcroît, des analogies inattendues avec d'autres phénomènes électriques importants, tels que ceux de la *grêle*, des *trombes*, des *aurores polaires*, etc.

Ce sont ces analogies et leurs conséquences que nous avons développées dans le présent ouvrage, et que nous publions, avec le désir de jeter quelque jour sur la théorie de ces grands phénomènes naturels.

GASTON PLANTÉ.

Janvier 1883.

PHÉNOMÈNES
ÉLECTRIQUES
De l'Atmosphère

CHAPITRE PREMIER

DE LA FOUDRE GLOBULAIRE

I

Expériences permettant de reproduire, à l'aide de courants électriques de haute tension, des phénomènes analogues à ceux de la foudre globulaire.

§ 1. *Appareils employés.* — Les appareils dont nous avons fait usage consistent en un certain nombre de batteries secondaires, à lames de plomb, planes ou roulées en spirale, suivant l'intensité des effets que l'on veut obtenir, immergées dans de l'eau acidulée au 1/10 par de l'acide sulfurique,

et pouvant être chargées simultanément en *quantité*, puis déchargées en *tension*[1].

La figure 35 de ce livre représente six de ces batteries, composées chacune de 80 couples, disposées sur des gradins, et se chargeant à l'aide de 3 éléments Becquerel-Daniell à sulfate de cuivre, ou de 2 éléments Grove-Bunsen à acide nitrique.

Nous avons le plus souvent mis en action dix à vingt de ces batteries, soit 800 à 1600 couples secondaires, chargés par cette faible source d'électricité voltaïque, et pouvant donner, dans les premiers instants de leur décharge, une force électromotrice de 2000 à 4000 volts.

§ 2. *Globules liquides lumineux.* — Lorsqu'on met en communication trois de ces batteries avec un vase plein d'eau salée, de telle sorte qu'un fil de platine négatif étant plongé d'avance dans le liquide, on approche un autre fil de platine positif

1 Voir *Recherches sur l'électricité de 1859 à 1879*, 2e édition. Paris, 1883.

de la surface du liquide, on voit se former, à son extrémité, un petit globule lumineux, accompagné d'un bruissement particulier (fig. 1).



Fig. 1. — Globule liquide lumineux formé par un courant électrique de haute tension.

Les fils de platine, en relation avec les pôles de la batterie, sont reliés à des tiges à crémaillères, de manière à pouvoir les introduire lentement dans le liquide.

En relevant un peu le fil métallique, le globule augmente de volume, comme si le liquide était

aspiré par l'électrode, acquiert un diamètre d'un centimètre environ, prend en même temps un rapide mouvement gyratoire, et s'aplatit même par suite de ce mouvement (fig. 2).

Le mouvement gyratoire n'a pas lieu invariablement dans le même sens, comme les mouvements gyratoires magnéto-électriques que nous décrirons plus loin. Il a lieu tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. Souvent il se produit un grand nombre de fois de suite dans le même sens; mais ce sens peut changer sans cause apparente.

C'est un mouvement gyratoire de réaction analogue à ceux des tourniquets électriques, et dû à l'écoulement du flux électrique dans le liquide. Le globule se trouvant presque détaché, par sa forme sphéroïdale, du reste du liquide du voltamètre, ou n'ayant qu'une faible surface de contact avec ce liquide, le mouvement s'opère dans un sens ou dans l'autre, suivant la position du point de la surface du globule par lequel se fait le principal écoulement du courant ou bien le dégagement de la vapeur produite.

L'apparence lumineuse de tout le globule paraît provenir de la vive lumière émise à son contact avec le reste du liquide.



FIG. 2. — Globule liquide lumineux s'aplatissant par le mouvement gyratoire.

Le bruissement est dû à la condensation, dans le liquide, de la vapeur qui tend à se former autour de l'électrode.

Quant à l'agrégation même du liquide sous cette forme globulaire, nous pensons qu'on peut se l'expliquer par un phénomène *d'aspiration* résul-

tant de l'écoulement même du flux électrique, au pôle positif. Nous verrons plus loin cette aspiration rendue encore plus frappante, en employant un courant d'une plus grande tension et en limitant l'espace au liquide autour de l'électrode, renfermée dans un tube étroit (*pompe voltaïque*, § 70). Mais ici, le liquide, n'ayant point d'espace limité, s'agglomère naturellement sous la plus petite surface possible et prend la forme sphéroïdale[1].

Quant à la cause même de cette aspiration, elle nous paraît être simplement due à l'effet calorifique très énergique produit par ces courants de haute tension, qui développe de la vapeur, aux points touchés par l'électrode, avec une telle rapidité, que le vide produit doit être immédiatement comblé.

[1] Cette forme sphéroïdale prise par un liquide sous l'action de l'effet calorifique produit par le courant électrique peut être rapprochée, du reste, de celle qui se manifeste également, sous l'action de la chaleur seule avec les liquides placés sur des surfaces incandescentes, et qui a été étudiée par Boutigny. C'est aussi la forme que prennent les liquides simplement soustraits à l'action de la pesanteur, comme le montrent les expériences de Plateau.

§ 3. *Globules de feu.* — En employant une source d'électricité supérieure à la précédente, soit dix batteries formant un total de 800 couples secondaires, mais en ajoutant dans le circuit une colonne d'eau distillée, pour éviter la fusion de



FIG. 3. — Globule de feu produit à la surface de l'eau distillée par un courant électrique de haute tension.

l'électrode, et faisant plonger d'avance le pôle positif dans un vase rempli d'eau distillée, au lieu d'eau salée, il se forme, lors de l'approche du pôle négatif à la surface du liquide, un véritable *globule de feu* de 8 à 10 millimètres de diamètre (fig. 3).

§ 4. Ce globule de feu est parfois animé d'un rapide mouvement gyratoire, analogue à celui du

globule liquide lumineux précédemment décrit. Dans le globule liquide, le mouvement gyratoire, très visible d'ailleurs, était rendu encore plus manifeste par l'aplatissement même du globule. Pour reconnaître ce mouvement gyratoire dans le globule de feu, il suffit de relever un peu l'électrode ; le globule prend alors une forme ovoïde. La partie inférieure par laquelle il touche la surface du liquide, au lieu d'offrir une plaque lumineuse brillante et continue, apparaît alors parsemée d'innombrables points bleus lumineux ; chacun de ces points correspond à l'un des filets lumineux courbes dont la réunion forme cette sorte d'aigrette voltaïque constituant le globule de feu. Or ces points ne restent pas immobiles ; on les voit prendre un mouvement gyratoire très rapide, et tel, que, par suite de la persistance d'action sur la rétine, ils forment bientôt des cercles bleus lumineux concentriques. C'est un mouvement de réaction du même genre que celui des globules liquides lumineux produit par l'écoulement même du flux électrique.

§ 5. Le globule de feu est constitué par de l'air raréfié incandescent, par la vapeur du métal de l'électrode, dont l'extrémité est portée toujours à une haute température, et par les éléments de la vapeur d'eau décomposée.

L'analyse spectrale y montre surtout clairement la présence de l'hydrogène, et la lumière bleue qui se manifeste, au point de contact des filets lumineux et du liquide, est également caractéristique de ce gaz.

§ 6. Lorsque l'électrode métallique est positive, et l'eau distillée négative, l'étincelle affecte encore extérieurement une forme globulaire ou ovoïde ; mais le milieu est traversé par un cône de lumière violacée.

Quand on emploie deux électrodes métalliques, on obtient un sphéroïde lumineux dont l'intérieur est traversé par un trait brillant. Cette apparence correspond au trait et à l'auréole de l'étincelle des courants d'induction ; seulement, ici, l'auréole occupe plus d'espace, par suite encore de la plus grande quantité d'électricité. En effet, si l'on aug-

mente beaucoup la longueur de la colonne d'eau interposée, on n'obtient plus qu'un arc ou un trait rectiligne.

Il n'est pas nécessaire, dans ces expériences, d'amener l'électrode au contact de l'eau pour déterminer le passage du flux électrique. La tension des batteries, bien que les couples qui la composent ne soient pas isolés d'une manière particulière, est assez grande pour que l'étincelle éclate spontanément à 1 millimètre environ au-dessus du liquide.

§ 7. Si, au lieu de laisser l'électrode fixe à la surface du voltamètre, pendant la production de l'écoulement du flux électrique sous la forme de ces étincelles globulaires, on suspend l'un des fils servant d'électrode à une assez grande hauteur, et qu'on lui donne assez de poids et de longueur pour pouvoir osciller comme un pendule à la surface du liquide ou au-dessus d'une plaque conductrice, sans que sa distance à cette surface change sensiblement, le petit globule de feu, produit à l'extrémité du fil, suit naturellement les mouvements de

l'électrode, et, quand on opère dans l'obscurité, on ne voit que le globule de feu se mouvoir à la surface du liquide.

§ 8. *Globule de feu ambulant.* — L'étincelle électrique, sous cette forme globulaire résultant de l'action d'une grande quantité d'électricité sur la matière pondérable, peut être animée, par elle-même, d'un mouvement de progression, sans qu'il soit nécessaire de faire mouvoir l'une ou l'autre électrode.

C'est ce qui résulte de l'expérience suivante[1] :

Si on met en communication les deux pôles de la batterie secondaire de 800 couples avec les armatures d'un condensateur dont la lame isolante est formée par une feuille de mica, ce condensateur se charge comme une bouteille de Leyde, et peut donner, quand on le décharge, une étincelle du genre de celles de l'électricité statique.

Mais, si la lame de mica présente, par hasard,

[1] *Comptes rendus*, t. LXXXVII, p. 325, 19 août 1878.

quelque point très mince, ou quelque fissure produite lors de son clivage, cette lame se perce spontanément en ce point, sous l'action du courant des 800 couples secondaires, de même



Fig. 4. — Globule de feu *ambulant* produit à la surface d'un condensateur par un courant électrique de haute tension.

que le verre d'une bouteille de Leyde trop fortement chargée par une machine électrique.

Un phénomène remarquable se présente alors à l'observation. Par suite du grand pouvoir calorifique de l'électricité en jeu dans cette expérience, l'étin-

celle qui a éclaté sur un point du condensateur, entre les deux armatures, n'a point une durée instantanée comme celles de l'électricité statique ; mais comme elle est accompagnée de la fusion du métal et même de la matière isolante du condensateur, elle forme un petit globule lumineux, très brillant, qui se met en mouvement avec un bruissement particulier, et trace lentement, sur la lame d'étain du condensateur, un sillon profond, sinueux et irrégulier (fig. 4).

La figure 5 offre une copie fidèle de la portion de la surface d'un condensateur où le phénomène s'est produit. Quelquefois l'étincelle reste quelque temps stationnaire autour du même point; d'autres fois encore, l'une des ramifications s'allonge démesurément, et décrit, sur toute la surface, des contours analogues à ceux d'une carte géographique. Un tube à eau distillée a été préalablement interposé dans le circuit de la batterie secondaire, pour éviter des effets calorifiques trop intenses et la déflagration de tout le condensateur.

Pendant que le phénomène se produit, on ne

peut prévoir d'avance par quels points passera l'étincelle; rien n'est plus bizarre que la marche de ce petit globule éblouissant que l'on voit che-



Fig. 5. — Sillons tracés sur un condensateur par un globule de feu *ambulant.*

miner lentement et choisir les points sur lesquels il doit se diriger, suivant la résistance plus ou moins grande des divers points de la lame isolante.

Le condensateur se trouve en même temps scié

ou découpé à jour sur tout le trajet du globule étincelant[1].

§ 9. Nous développerons ci-après l'analogie de ces effets avec ceux de la foudre globulaire.

Pour mieux imiter encore les conditions dans lesquelles se produit le phénomène naturel, nous avons augmenté la tension de la source d'électricité dynamique, et mis en jeu le courant d'une batterie secondaire de 1600 couples, dont la force électromotrice, dans les premiers instants de la décharge est de 4000 volts environ. Supprimant, d'autre part, la lame de mica et les armatures métalliques, puisqu'il n'y a dans l'atmosphère que des masses d'air et de vapeur d'eau, nous avons opéré simple-

[1] Cette expérience, que nous avons faite pour la première fois en 1877, est assez difficile à répéter ; car elle exige l'emploi d'une batterie de 800 couples secondaires.

M. Charles Moussette est parvenu récemment à obtenir un effet à peu près analogue en faisant passer l'effluve d'une machine de Holtz à la surface d'une plaque photographique développée et recouverte, par suite, d'une couche de gélatine contenant de l'argent réduit. De petites boules de feu, détachées de l'effluve, se sont promenées sur la plaque, et y ont tracé des sillons sinueux irréguliers, comme dans l'expérience décrite ci-dessus.

ment avec des surfaces humides électrisées, séparées par une couche d'air. Ces surfaces humides étaient constituées par des tampons ou des disques de papier à filtrer humecté d'eau distillée (fig. 6).

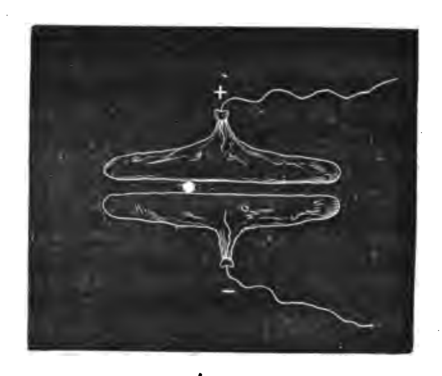


Fig. 6. — Globule de feu *ambulant* produit entre deux disques de papier humide par un courant électrique de haute tension.

Dès qu'on met ce système en relation avec es pôles de la batterie, on voit apparaître une *boule de feu* qui court, de côté et d'autre, entre les deux surfaces, et présente des intermittences spontanées dans son apparition et sa disparition, pendant plusieurs minutes. Comme la batterie se

décharge ainsi moins rapidement qu'entre des armatures métalliques, l'expérience dure en effet plus longtemps.

II

Analogies des phénomènes précédents avec les effets de la foudre globulaire. — Explication de la foudre globulaire.

§ 10. Les phénomènes que nous venons de décrire nous paraissent pouvoir conduire à l'explication de la foudre globulaire.

On a vu, en effet, que la matière pondérable tendait à prendre la forme globulaire, sous l'influence d'une source puissante d'électricité dynamique. Nous avons constaté d'abord cette propriété sur les liquides et observé des globules liquides lumineux. En augmentant la tension, nous avons obtenu, même au sein de l'air, mélangé de vapeur d'eau, de véritables *globules de feu*.

Nous sommes donc conduit naturellement à penser que *la foudre globulaire doit être produite par un flux d'électricité à l'état dynamique dans lequel la quantité est jointe à la tension.*

C'est, en effet, dans les plus grands orages[1], lorsque l'électricité est très abondante dans l'atmosphère, et que ses décharges peuvent constituer une sorte de puissant courant électrique à très haute tension, que la foudre se présente sous la forme *globulaire,* au lieu d'affecter la forme simplement linéaire, analogue à celle des étincelles des machines de l'électricité statique, comme cela a lieu dans les orages de moindre intensité.

§ 11. *Nature des globes fulminants.* — La nature des globes fulminants doit être vraisemblablement la même que celle des étincelles globulaires produites dans nos expériences.

Ces globes doivent être formés, selon nous, *d'air*

[1] Dr Sestier, *De la foudre,* t. I, p. 122, 123, 129, 132 à 135, 140 à 147. Paris, J.-B. Baillière et Fils, 1866.

raréfié incandescent et des gaz résultant de la décomposition de la vapeur d'eau, également à l'état de raréfaction et d'incandescence.

L'eau est, en effet, non seulement vaporisée, mais décomposée, à l'extrémité d'un même pôle, par suite de la température très élevée que développe un courant électrique de haute tension.

Bien qu'une surface aqueuse ne soit pas indispensable pour la formation des globules électriques lumineux, puisque nous en avons obtenu au-dessus d'une surface métallique, la présence de l'eau ou de la vapeur d'eau facilite du moins leur formation, ou tend à leur donner plus de volume, en raison de la présence des gaz que fournit la dissociation de l'eau à haute température.

Nous avons observé plus d'une fois, dans nos expériences, quand toute la décharge était consacrée à produire un seul phénomène, des flammes électriques, en forme de sphère aplatie ou de calotte sphérique, qui couvraient toute la surface du petit

vase plein d'eau[1] sur laquelle venait déboucher le courant de haute tension.

Aussi l'air humide semble-t-il plus favorable à la production des globes fulminants et on les a vus souvent apparaître, soit sur un sol inondé, à la suite d'une pluie abondante[2], soit dans une atmosphère saturée d'humidité. Nous en citerons plus loin de nouveaux exemples.

Ce n'est pas que nous considérions les globes

[1] Ce vase avait environ $0^m,04$ de diamètre.

[2] Voir Arago, *Notice sur le tonnerre*, p. 46.

« A Massa-Carara, le 10 septembre 1713, pendant un orage et *une pluie en quelque sorte diluviale*, Maffei et le marquis de Malaspina virent subitement apparaître, à la surface du pavé, un feu très vif, d'une lumière en partie blanche et en partie azurée ; ... ce feu semblait fortement agité, mais sans mouvement progressif; il se dissipa, tout à coup, mais après avoir acquis un grand volume. »

— *Ibid.*, p. 50. (Observation faite à Trieste, en 1841, et adressée par M. Butti à Arago.) ... « Le tonnerre éclatait de temps en temps avec un bruit épouvantable. La rue était déserte, car la pluie tombait à verse et *la voie publique était convertie en un torrent*... La première chose qui frappa mes yeux fut *un globe de feu qui marchait au milieu de la rue*... Pour donner une idée de la grandeur de ce globe igné, de sa couleur, je ne puis que le comparer à la lune ; ... mais on ne voyait pas de contours précis dans le météore; il semblait enveloppé dans une atmosphère de lumière dont on ne pouvait pas marquer la limite précise. »

fulminants comme renfermant un mélange détonant formé par les gaz dissociés de la vapeur d'eau, et comme devant à cette cause le bruit qui accompagne souvent leur apparition. Ces gaz sont ici tellement raréfiés qu'ils ne pourraient produire d'explosion; ils sont, de plus, à l'état d'incandescence, et, par suite, dans des conditions tout à fait différentes de celles d'un mélange explosif, produit à froid, qui serait ensuite enflammé subitement.

§ 12. Le mode de formation des globes fulminants s'explique de la même manière que celle des globules de feu obtenus dans les expériences décrites précédemment.

L'agglomération sphérique de la matière soumise à l'action d'un puissant flux électrique résulte, comme nous l'avons dit, de l'aspiration ou du vide produit par le passage même du courant.

Chacun de ces globes est une sorte d'*œuf électrique*, sans enveloppe de verre, une *aigrette voltaïque*, que le milieu environnant tend sans cesse à remplir; mais l'abondance du flux électrique

raréfie la matière à mesure qu'elle afflue dans le milieu électrisé.

§ 13. *Éclat des globes fulminants.* — L'éclat de ces globes, qui est quelquefois très vif, comme l'ont remarqué divers observateurs [1], s'explique par la grande quantité de l'électricité en jeu lors de leur manifestation.

La lumière produite dans l'œuf électrique des cabinets de physique est faible, parce que la quantité d'électricité de tension qui les traverse est très minime. Mais on sait que, dans les parties rétrécies des tubes à gaz raréfiés, cette lumière est beaucoup plus vive et qu'elle a d'autant plus d'éclat que la machine électrique, ou l'appareil d'induction que l'on emploie, peut fournir une plus grande quantité d'électricité.

On peut compter aussi parmi les causes de la vivacité de la lumière émise quelquefois par les globes fulminants l'incandescence des particules

[1] Arago, *Notice sur le tonnerre*, p. 46 et 47.

cosmiques de l'atmosphère qui, bien qu'en quantité très minime, ajoutent leur éclat à celui de l'air et des gaz de la vapeur d'eau raréfiés et incandescents.

Ces particules cosmiques contiennent, en effet, outre les matières organiques, des matières minérales telles que le fer, la silice, la chaux, etc.[1], substances douées d'un grand pouvoir d'irradiation, à une haute température. Nous avons eu l'occasion d'observer des effets lumineux qui résultent en particulier de l'incandescence de la silice sous l'action de l'électricité (lumière électro-silicique).

§ 14. *Couleur des globes fulminants.* — La couleur des globes fulminants, qui est très variée, comme celle des éclairs ordinaires, dépend, suivant nous, des conditions hygrométriques de l'atmosphère, et aussi de la quantité d'électricité en jeu.

Si la vapeur d'eau est très abondante, l'hydro-

[1] Voir *les Poussières de l'air*, par Gaston Tissandier, p. 12. Paris, 1877.

gène provenant de sa dissociation domine, et le globe tend à avoir une couleur rouge, puisque c'est la couleur plus particulièrement propre à l'hydrogène raréfié traversé par un fort courant[1].

Si, d'autre part, le flux électrique est relativement moins abondant, la raréfaction et la dissociation sont moins complètes sur son parcours, et la couleur tend vers le bleu violacé propre à l'air raréfié.

Les nuances intermédiaires s'expliqueraient par les proportions variables entre les gaz raréfiés de l'air et de la vapeur d'eau.

§ 15. *Odeur produite par les globes fulminants.* — L'odeur particulière qui accompagne la chute des globes de feu et même de la foudre ordinaire peut s'expliquer encore par la combustion des parcelles cosmiques, jointe à celle de la matière même frappée directement par la décharge sur le point

1 On a observé, en effet, très fréquemment des globes de feu d'un rouge vif, de couleur pourpre, etc. Sestier en cite de nombreux exemples.

où elle atteint le sol. On conçoit que dans le long parcours d'un éclair ou la traversée d'une colonne d'air par le flux électrique, les parcelles cosmiques rencontrées soient en assez grand nombre pour donner une odeur sensible par leur combustion.

L'ozone et les produits nitreux formés par la combinaison des éléments de l'air y contribuent aussi, sans doute, pour une certaine part.

L'odeur sulfureuse s'explique par la décomposition des matières organiques ou minérales rencontrées à la surface du sol et qui renferment souvent du soufre ou des sulfures.

§ 16. *Bruissement*. — Le bruissement qui accompagne l'apparition des globes fulminants et que l'on retrouve dans l'expérience décrite plus haut provient de la vaporisation rapide que développe le flux électrique.

Nous ajouterons que, pendant la décharge produite, en particulier, par l'électrode positive au-dessus de l'eau distillée, on entend comme un bruit de souffle très marqué, dû évidemment à la vapo-

risation de l'eau qui s'échauffe, sous l'action de la flamme émanant de cette électrode, bien plus fortement que sous l'action de l'électrode négative.

§ 17. *Signe électrique des globes fulminants.* — Ces considérations, jointes à celles du sens positif ordinaire de l'électricité atmosphérique, nous portent à penser que le signe électrique des globes fulminants, qui résultent de l'écoulement direct de l'électricité des nuages, doit être *positif*, tandis que celui des feux Saint-Elme, des aigrettes, colonnes lumineuses et autres effets électriques produits par influence doit être *négatif*.

§ 18. *Mouvement gyratoire.* — Le mouvement gyratoire que l'on a observé quelquefois dans les globes fulminants[1] doit résulter simplement de la réaction due à l'écoulement du flux électrique, de même que le mouvement gyratoire des globules liquides ou des filets lumineux composant les flammes ovoïdes formées à la surface du voltamètre.

[1] Sestier, *De la foudre*, t. I, p. 127.

§ 19. *Chute de foudre sous forme de plusieurs globes de feu.* — La foudre globulaire se présente, soit sous la forme d'une simple chute de boules de feu plus ou moins nombreuses, qui disparaissent immédiatement, soit sous la forme d'un globe unique qui se meut avec lenteur, et reste quelquefois longtemps visible.

Dans le premier cas, les globes de feu nous paraissent devoir leur origine à des éclairs d'un genre particulier que nous décrirons plus loin, sous le nom d'*éclairs en chapelet*, et dont nous expliquerons la formation.

Ce sont des éclairs produits par l'écoulement d'une plus grande quantité d'électricité que celle des éclairs ordinaires, et qui entraîne la production de ventres ou d'agglomérations sphériques de matière raréfiée électrisée sur leur parcours.

§ 20. *Marche lente des globes fulminants.* — Le second cas, consistant dans la marche lente d'un globe fulminant, peut se produire, selon nous, de deux manières différentes.

On a vu plus haut (§ 7) que les globules de feu, obtenus au-dessus de l'eau ou même au-dessus d'une surface conductrice quelconque, à l'aide d'un courant électrique de haute tension, suivaient natu-



Fig. 7. — Globe fulminant formé à l'extrémité d'une trombe.

rellement les mouvements de l'électrode à l'extrémité de laquelle ils se produisent; que, si l'on opérait dans l'obscurité, ou si on masquait par un écran le fil servant d'électrode et oscillant comme un pendule, on ne voyait plus qu'un globule de feu en mouvement au-dessus de la surface conductrice.

De même, dans la nature, si un nuage orageux, chargé d'une grande quantité d'électricité, vient à passer à une faible hauteur au-dessus du sol, il peut se former *une colonne ou trombe d'air humide fortement électrisée, visible ou invisible, qui sert d'électrode*, et produit l'écoulement du courant électrique sous forme d'un globe de feu qui apparaît à son extrémité. Cette colonne étant essentiellement mobile, le globe de feu en suivra naturellement tous les mouvements (fig. 7).

§ 21. Mais la marche lente des globes fulminants peut se produire aussi, d'une autre manière, alors même qu'il n'y aurait pas déplacement d'une colonne d'air humide électrisée.

Nous avons montré, par l'expérience *du globule électrique ambulant* (§ 8, fig. 4), comment, dans certaines conditions, une étincelle globulaire pouvait se mouvoir spontanément d'une manière assez lente pour qu'on pût assister au développement successif de ses capricieuses sinuosités. Il suffisait de déterminer la production d'une étincelle *d'électricité dynamique à haute tension* entre les deux

armatures d'un condensateur dont la lame isolante très mince pouvait être facilement percée, ou présentait d'avance quelque fissure. L'étincelle, au lieu d'avoir une durée instantanée, cheminait alors en brûlant devant elle la matière même du condensateur et s'agrégeant en un globule de feu.

On peut donc admettre qu'il se forme de même dans l'atmosphère, sur le point où apparaît la foudre globulaire, les éléments d'un condensateur, dans lequel une couche ou colonne d'air humide fortement électrisée joue le rôle de l'armature supérieure, le sol celui de l'armature inférieure, et la couche d'air interposée celui de la lame isolante[1].

[1] L'intervention d'une bande d'air isolante, dans la production du phénomène, avait été, du reste, déjà admise par du Moncel : « La marche lente du globe de feu, dit du Moncel, ne serait que le résultat des variations dans la direction de cette bande isolante ou du courant d'air qui l'aurait motivée, variations qui déplaceraient le point où l'écoulement du fluide électrique se manifesterait à l'état lumineux. » (*Notice sur le tonnerre et les éclairs*, p. 51. Paris, 1857.)

Des observations récentes d'un grand intérêt faites par M. Hauvel, lors d'une ascension qui fut terminée par un orage, tendent à confirmer ces vues ; car elles montrent qu'il y a fréquemment, pendant les orages, formation de condensateurs à lames d'air entre deux

Cette couche d'air isolante étant traversée par le flux électrique, l'écoulement se produit sous la forme globulaire entre le sol et la colonne ou couche humide électrisée formant l'armature supérieure (fig. 8). Quand la base de cette colonne offre une certaine étendue, comme cela arrive, si elle forme une portion même de la nuée électrisée descendue très près du sol, le globe de feu reste en communication avec cette armature, sans qu'elle se déplace, et continue seul sa marche en traversant la couche d'air isolante, d'une manière irrégulière, suivant les variations d'épaisseur ou de résistance qu'elle présente, de même que, dans notre expérience, le petit globule de feu chemine entre l'armature supérieure et l'armature inférieure du condensateur, sans le déplacement des électrodes ni des armatures.

amas nuageux séparés l'un de l'autre, et décharge de ces condensateurs, soit lorsque l'amas nuageux supérieur se résout en pluie, et se met ainsi en communication avec l'amas nuageux inférieur, soit lorsque l'ensemble du système se trouve mis de la même manière en communication avec le sol. *(Congrès des Sociétés savantes à la Sorbonne ; Cosmos,* 18 juin 1887, p. 332.)

De même que dans l'intéressante relation de Babinet, rappelée par Arago[1], sur un cas de foudre globulaire, observé rue Saint-Jacques, à Paris, un globe de feu, après s'être promené lentement,



Fig. 8. — Globe fulminant émanant directement d'un nuage, et animé d'un mouvement ambulatoire, par suite de la présence d'une couche d'air sec isolante au-dessus du sol.

remonta tout à coup le long d'une cheminée et se dirigea vers un point du mur où avait passé un tuyau de poêle, mais recouvert de papier que,

[1] Arago, *Notices scientifiques*, t. I. — *Le Tonnerre*, p. 52.

suivant l'expression de l'ouvrier témoin du phénomène, le tonnerre en boule ne pouvait point voir, le perça et rejoignit ainsi le courant d'air de la cheminée qui lui offrait une voie meilleure conductrice, — de même dans l'expérience citée plus haut, le globule de feu se promène à la surface du condensateur, et semble chercher les parties les plus minces du mica pour le percer plus facilement et rejoindre l'autre armature[1].

Dans l'expérience que nous rappelons, l'étincelle est, il est vrai, un globule de matière solide en fusion; mais dans l'expérience décrite paragraphe 9 (fig. 6), il n'y a que des masses humides en jeu, et le glo-

[1] Sestier a cité un cas de foudre globulaire tout à fait analogue (t. I, p. 136).

M. le colonel Laussédat nous a relaté que, vers 1830, pendant un violent orage qui éclata à Bourbon-l'Archambault, M. Boussac, receveur des postes de cette localité, vit un globe de feu pénétrer dans la pièce qu'il occupait, passer près de lui et sortir également par la cheminée.

Voir aussi la relation d'un grand nombre de cas de foudre globulaire dans les intéressants rapports de M. F. Évrard, ingénieur en chef des Télégraphes belges, sur les *Observations des coups de foudre en Belgique* (*Bulletin de la Société belge d'électriciens*, 1885, 1886, et particulièrement 1887, t. IX, p. 299, 300, et tableaux annexés).

bule de feu n'est formé que d'air et de vapeur d'eau à l'état de raréfaction et d'incandescence.

On pourrait objecter aussi à ces comparaisons que les globes de feu naturels ne se produisent point, à l'extrémité d'électrodes métalliques. Mais on admet aujourd'hui l'identité de la foudre et des étincelles des machines électriques, bien que ces étincelles partent de conducteurs métalliques, et les amas de vapeur d'eau qui forment les nuages électrisés sont considérés comme des conducteurs analogues. Il est donc permis d'assimiler de même à une électrode métallique, conduisant un courant de haute tension, une colonne d'air humide par laquelle l'électricité des nuages orageux descend quelquefois jusque près de la surface du sol.

§ 22. *Globes fulminants produits par influence.* — Il peut arriver que la nuée orageuse ne soit pas assez rapprochée du sol pour que l'électricité s'en écoule d'une manière directe sous la forme globulaire, et qu'elle exerce néanmoins une influence extrêmement puissante sur quelques points du sol,

par suite de la quantité et de la tension de l'électricité qu'elle renferme.

Dans ce cas, il peut se manifester soit des aigrettes ou des colonnes lumineuses (fig. 9) (voir

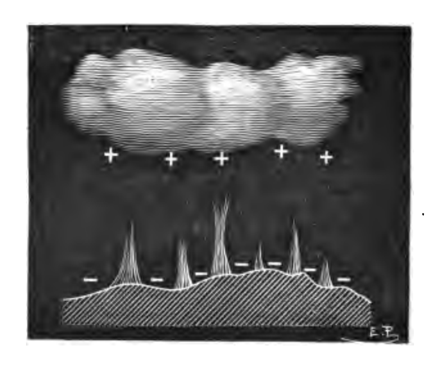


Fig. 9. — Colonnes et aigrettes lumineuses formées à la surface du sol sous l'influence d'un nuage fortement électrisé.

§ 33), comme on en a de fréquents exemples, notamment les feux Saint-Elme, etc., soit des globes de feu (fig. 10), et si le sol est recouvert d'une couche d'air plus sèche que le milieu environnant, et relativement isolante, ces globes peuvent se mouvoir d'une manière lente et capricieuse comme notre globule ambulant.

Ainsi a-t-on vu quelquefois des globes fulminants sembler se poser sur des fils télégraphiques, ou se mouvoir à une certaine distance du sol[1].



Fig. 10. — Globe fulminant formé à distance sous l'influence d'un nuage fortement électrisé, et animé d'un mouvement ambulatoire par suite de la couche d'air isolante qui le sépare du sol.

§ 23. *Globes de feu produits au sein des nuages.* — L'expérience que nous avons décrite paragraphe 9

1 Dans une lettre adressée à Pouillet, M. de l'Épée a cité le cas suivant de foudre globulaire, observé à Beuzeville pendant un orage, le 17 mai 1852 :

« On aperçut un globe de feu de la grosseur apparente d'un petit

(fig. 6) reproduit très exactement l'apparence des globes de feu qui se produisent quelquefois au

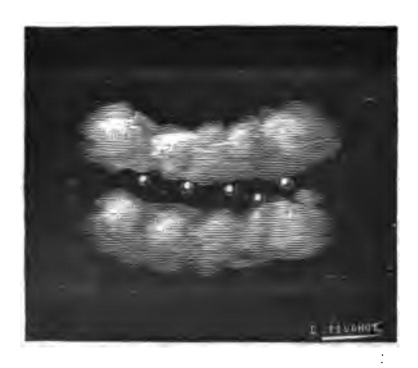


FIG. 11. — Globes de feu formés dans les nuages.

sein des nuages (fig. 11) et dont Arago et Sestier ont cité divers exemples[1].

obus, marchant avec une vitesse modérée suivant une courbe régulière et paraissant, d'après sa direction, devoir dépasser la station sans s'y arrêter. On se le montrait avec admiration, quand on le vit se poser, comme un oiseau, sur les fils électriques, à une certaine distance de la station. A ce moment, il disparut. » (Du Moncel, *Notice sur le tonnerre et les éclairs*, p. 45. Paris, 1857.)

[1] Arago, *Notice sur le tonnerre*, p. 40 et 41. — Sestier, *De la foudre*, t. I, p. 124 et 125.

§ 24. *Disparition des globes fulminants avec ou sans bruit.* — On peut s'expliquer également, par les considérations qui précèdent, comment les globes fulminants disparaissent quelquefois sans bruit, ou sont accompagnés, dans d'autres cas, du bruit du tonnerre.

Quand l'épaisseur de la couche d'air isolante qui sépare la couche nuageuse électrisée de la surface du sol devient trop grande, sur le parcours du globe fulminant, et quand, d'autre part, la quantité d'électricité fournie par la nuée orageuse n'augmente pas, l'écoulement électrique cesse, et la flamme globulaire disparaît sans bruit, de même que le globule de feu produit à la surface du condensateur cesse d'apparaître quand l'épaisseur de la lame isolante devient trop grande.

Si, au contraire, l'orage augmentant d'intensité, ou la nuée électrisée se rapprochant plus du sol, de nouvelles quantités d'électricité viennent affluer à la surface de la couche d'air isolante, l'écoulement, au lieu de continuer de se faire d'une manière relativement calme et silencieuse, sous la forme glo-

bulaire, s'opère brusquement, sous la forme d'une décharge proprement dite, accompagnée du bruit du tonnerre.

On conçoit alors que, du point même où apparaissait le globe fulminant, partent, dans tous les sens, des traits de foudre sinueux ou en zigzag qui frappent les objets environnants.

§ 25. Mais nous n'entendons point dire par là que le bruit soit dû à l'explosion du globe fulminant lui-même.

Si on se reporte aux notions que nous avons données sur leur nature, d'après les analogies tirées de nos expériences, on comprend que ce n'est point une petite masse d'air raréfié et lumineux par le passage du flux électrique qui peut éclater avec le bruit du tonnerre et se résoudre en traits foudroyants.

La source du phénomène final est dans le réservoir même d'électricité que renferme la nuée orageuse, et qui se décharge au point où l'écoulement avait commencé sous la forme du globe de feu.

§ 26. Quand la foudre globulaire se manifeste sous la forme d'une chute de globes de feu qui n'apparaissent qu'un instant, le bruit du tonnerre accompagne cette chute et ne doit pas être attribué non plus aux globes eux-mêmes, mais à tout l'ensemble de l'éclair *en chapelet* d'où ils dérivent et dont ils constituent des grains détachés.

L'intensité exceptionnelle du bruit du tonnerre, mentionnée souvent dans les relations de chute de foudre globulaire, s'explique encore par la *quantité* d'électricité en jeu, toujours plus grande pour la manifestation de ce phénomène que dans les cas ordinaires.

Le volume du flux électrique, si l'on peut s'exprimer ainsi, c'est-à-dire la masse de matière pondérable traversée et raréfiée par la décharge, est alors plus grand. De là naturellement un plus grand vide produit.

Mais comment l'électricité produit-elle le vide ? s'est-on demandé pendant longtemps. Nos expériences permettent, croyons-nous, d'y répondre simplement : Par l'action calorifique puissante et

instantanée que développe l'électricité et qui vaporise toute matière placée sur son passage.

La plupart des phénomènes que nous avons observés (voir § 46 et 70) ne sont, en effet, que des conséquences de la vaporisation produite, sur des liquides ou des surfaces humides, par un flux électrique réunissant à la fois la quantité et la tension.

§ 27. *Inefficacité des paratonnerres ordinaires dans les cas de foudre globulaire.* — On s'explique comment les paratonnerres ont été souvent inefficaces dans les cas de foudre globulaire, en considérant que l'apparition du globe fulminant révèle un commencement d'écoulement abondant et continu de l'électricité de la nuée orageuse en un *point d'élection* particulier, et que la simple action d'*influence* exercée par le voisinage d'un paratonnerre ne saurait arrêter cet écoulement une fois déterminé.

De même que l'entonnoir d'un pluviomètre ne peut recueillir l'eau d'une trombe, si l'extrémité de

cette trombe passe à une certaine distance de l'appareil, de même un paratonnerre peut rester impuissant à côté d'un écoulement local abondant d'électricité sur un point déterminé.

Quand il y a trombe ou foudre globulaire produite, il y a en quelque sorte une *électrode nuageuse* constituée, c'est-à-dire une voie suivie par l'écoulement de la pluie ou de la foudre et qui ne peut être déviée par le voisinage d'une autre électrode, telle que celle d'un paratonnerre, destinée à agir, par influence, sur des nuées électrisées d'une grande étendue, placées directement au-dessus. De même dans notre expérience du globule électrique ambulant, l'approche d'une pointe ne modifie point la marche du phénomène ; l'écoulement électrique est trop lié à l'électrode pour pouvoir être influencé ou dévié.

Si les globes fulminants à mouvements lents paraissent inoffensifs par eux-mêmes, puisque des observateurs, auprès desquels ils se sont pour ainsi dire promenés, n'en ont reçu aucune atteinte, ils n'en sont pas moins la source de grands dan-

gers; car ils représentent soit l'extrémité même de l'électrode nuageuse, soit ce point d'élection où elle exerce sa plus grande influence, et ils annoncent une tendance à une décharge imminente d'autant plus destructive qu'il y a une plus grande *quantité* d'électricité en jeu.

On ne saurait donc trop multiplier les directions dans lesquelles peut agir un paratonnerre pour prévenir la formation de ce point particulier d'écoulement d'un flux abondant d'électricité.

Les paratonnerres à pointes multiples de Melsens paraissent tout à fait indiqués dans ce cas et préférables à des paratonnerres à pointe unique d'une grande hauteur.

§ 28. *Conclusion.* — En résumé, les expériences que nous avons décrites, et particulièrement celle du *globule de feu ambulant*, permettent d'expliquer les divers effets de la foudre globulaire ou du tonnerre en boule.

La foudre globulaire, quand elle se manifeste sous sa forme la plus remarquable, celle d'un globe

de feu qui chemine lentement à la surface du sol, nous paraît pouvoir être considérée comme *une décharge lente et partielle, soit directe, soit par influence, de l'électricité des nuées orageuses, lorsque cette électricité est en quantité exceptionnellement abondante, et que la nuée elle-même ou la colonne d'air électrisée qui en forme ponr ainsi dire l'électrode se trouve très rapprochée du sol, ou n'en est séparée que par une couche d'air isolante de faible épaisseur.*

La marche lente et capricieuse des globes fulminants se produit, comme celle des globules de feu électriques décrits dans les expériences ci-dessus, par les variations de résistance de la couche d'air qui les sépare du sol, et par la tendance naturelle du flux électrique à chercher la ligne de moindre résistance pour son écoulement vers la terre.

C'est ainsi qu'on peut se rendre compte, selon nous, des effets de la foudre globulaire. Ces effets semblaient être une énigme indéchiffrable, tant que l'on n'avait pour terme de comparaison que les

effets des machines à frottement ou à influence, dans lesquels la quantité d'électricité en jeu est trop minime pour présenter des phénomènes analogues. Ils deviennent au contraire faciles à comprendre quand on les rapproche des phénomènes que nous avons observés avec une source d'électricité dynamique, réunissant à la fois la *quantité* et la *tension*[1].

[1] *Comptes rendus de l'Académie des sciences,* 3 mai 1875, 21 août 1877, 1er octobre 1877, 19 août 1878, et 11 août 1884.

II

Observation de quelques cas de foudre globulaire. — Éclairs en *chapelet*.

§ 29. *Cas de foudre globulaire à Paris, en 1876.* — Les explications qui précèdent paraissent s'accorder, d'une manière satisfaisante, avec les faits que nous avons eu l'occasion de recueillir ou d'observer nous-même sur la foudre globulaire[1].

Les conditions indiquées plus haut comme étant favorables à la manifestation du phénomène, c'est-à-dire la présence d'une grande quantité d'élec-

[1] *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXXIII, p. 321 et 484, 31 juillet et 21 août 1876.

tricité dans l'atmosphère, constituant, par la fréquence ou la continuité de ses décharges, une sorte de flux dynamique, jointe à la production d'une pluie abondante saturant l'air de vapeur d'eau, se sont trouvées réalisées, lors de deux violents orages qui éclatèrent à Paris, les 24 juillet et 18 août 1876.

Aussi la chute de la foudre fut-elle constatée, sur plusieurs points, sous la forme globulaire.

§ 30. Le 24 juillet, entre 3h.1/2 et 4 heures de l'après-midi, une pluie torrentielle mêlée de grosse grêle, et accompagnée d'éclairs et de tonnerre, s'abattit sur la place de la Bastille, que nous traversions en ce moment. Le vent étant relativement faible, la nuée orageuse se maintint presque fixe pendant quelques minutes; les décharges étaient incessantes, et plusieurs coups de tonnerre, succédant aux éclairs sans intervalle appréciable, annoncèrent que la foudre était tombée plusieurs fois dans le voisinage.

Nous étant livré aussitôt à une enquête, nous apprîmes que le météore venait de tomber trois fois de suite presque au même point, sur le théâtre

Beaumarchais, dans la cour et dans le jardin de la maison n° 28 de la rue des Tournelles, connue au Marais sous le nom de l'hôtel de Ninon de Lenclos.

Le régisseur du théâtre, qui se trouvait dans le magasin des costumes, petit pavillon situé à la partie supérieure de l'édifice, avait vu tomber une *bombe de feu* de la grosseur du poing.

Dans la rue des Tournelles, un ouvrier demeurant au quatrième étage avait aperçu un *globe de feu*, de la grosseur d'un boulet de canon, passer au bord du toit près d'un pot de fleurs, en ne brisant qu'une tige, et tomber dans la cour. Au même instant, un autre ouvrier placé au rez-de-chaussée observait trois petites *boules de feu* au-dessus du sol de la même cour qui était alors inondée.

De son côté, M. Languereau, fabricant de bronzes, voyait tomber deux ou trois parcelles incandescentes dans son jardin transformé en un vaste bassin par l'abondance de l'eau tombée comme une véritable *trombe*[1].

1 Les dégâts matériels furent insignifiants, comme on pouvait s'y attendre en raison même de la chute de cette colonne d'eau qui a

§ 31. Ces parcelles incandescentes ne devaient pas être formées de matière en ignition, mais particulièrement d'air raréfié et des gaz de la vapeur d'eau lumineux, comme les globules produits dans nos expériences[1].

Cependant, de même qu'on trouve des grêlons renfermant, à leur intérieur, des noyaux de matière organique ou minérale, il peut se trouver aussi, dans ce genre de parcelles lumineuses, quelques corpuscules cosmiques empruntés à l'atmosphère.

§ 32. *Éclairs en chapelet.* — L'orage du 18 août 1876 fut plus remarquable encore que le précédent par l'intensité des phénomènes électri-

pu conduire facilement la majeure partie du flux électrique jusqu'au sol. Un fragment de la toiture en zinc du théâtre, soulevé et lancé sur la maison voisine, le gaz enflammé à l'extrémité d'un tuyau de plomb, et quelques commotions ressenties par les diverses personnes témoins du phénomène, tels sont les seuls accidents qui furent constatés.

[1] Nous avons eu, en effet, l'occasion d'observer souvent que la moindre cause, telle qu'un souffle ou un courant d'air, suffisait pour en modifier la forme sphérique et en altérer les contours.

ques. Il survint à la suite d'une longue période de fortes chaleurs et de sécheresse, et fut accompagné d'une pluie torrentielle. Cet orage, dont nous suivîmes attentivement les diverses phases, d'un des points les plus élevés des environs de Paris, des hauteurs de Meudon, où nous nous trouvions à cette époque de l'année, nous fournit l'occasion d'observer un genre d'éclair très rare qui n'était point encore classé en météorologie et qui nous a paru de nature à jeter un nouveau jour sur la formation de la foudre globulaire.

L'orage se déclara, vers 6 heures du matin, aux environs de Paris. Une vaste nuée obscurcit le ciel et donna naissance à une série d'éclairs de grande longueur et de formes très variées : quelques-uns étaient bifurqués, d'autres présentaient des courbes à points multiples ou des contours fermés. L'un d'eux, replié sur lui-même, présenta une forme exactement semblable à celle de la courbe connue sous le nom de *folium* de Descartes.

Ces éclairs paraissaient, en général, composés de *points brillants*, semblables aux sillons de feu pro-

duits sur une surface humide par un courant électrique de haute tension.

Vers 7 heures du matin, au moment où l'orage commençait à s'étendre sur Paris, un éclair remarquable entre tous s'élança de la nue vers le sol en décrivant une courbe semblable à un S allongé, et resta visible pendant un instant appréciable, en formant *un chapelet de grains brillants*, disséminés le long d'un filet lumineux très étroit (fig. 12).

Cet éclair nous sembla frapper Paris dans la direction de Vaugirard. Les journaux publièrent, en effet, que la foudre était tombée à Vaugirard, à Grenelle, etc., et, de plus, qu'elle avait été vue sous la forme ovoïde ou globulaire[1].

[1] Nous extrayons des journaux publiés à Paris, le samedi 19 août 1876, les passages suivants :

« L'orage tant attendu 'est enfin arrivé. Vers minuit, les éclairs ont commencé à sillonner la nue, sans bruit, mais augmentant d'intensité de minute en minute. Vers 4 heures du matin, ils se succédaient sans interruption, comme les fusées d'un feu d'artifiee.

« On a remarqué que les coups de tonnerre étaient différents du grondement habituel. Ce n'était point le crépitement classique, mais une série de coups secs comme une canonnade. Le tonnerre

Il est probable que la chute de la foudre avait dû se produire simultanément sur divers points, et qu'elle s'était divisée en plusieurs *grains* dans le



FIG. 12. — Eclair *en chapelet*, observé des hauteurs de Meudon, pendant un violent orage sur Paris, le 18 août 1876.

voisinage du sol; car nous n'avions vu qu'un seul éclair atteindre la terre dans cette direction.

est tombé en plusieurs endroits et a produit d'assez curieux phénomènes.

« Ainsi, au boulevard de Vaugirard, 259, le fluide électrique est entré par la cheminée, a traversé une chambre habitée par une do-

La pluie était très abondante, en sorte que l'air traversé par la décharge devait être entièrement saturé de vapeur d'eau.

La foudre tomba encore, pendant cet orage, sous la forme globulaire[1], sur une maison portant le numéro 35 de la rue de Lyon. Ce fait fut mentionné également par tous les journaux[2], et nous

mestique, qui, heureusement, était absente, et après avoir communiqué le feu à un sac de linge, il est sorti de la chambre en brisant deux carreaux.

« ... *Presque au même instant*, la foudre frappait la maison n° 99, rue d'Assas. Le fluide, *sous forme cvoïde*, a démoli le pignon ouest de la maison et l'a projeté à une grande distance dans les jardins environnants. Les éclats de pierre de la corniche, en retombant sur le balcon du cinquième étage, faisaient jaillir des milliers d'étincelles. Le zinc dont était garni le pignon a été découpé comme à l'emporte-pièce. »

[1] « Il est vraisemblable, dit M. H. de Parville, que le phénomène du tonnerre en boule se produit plus souvent qu'on ne le pense; il aura échappé jusqu'ici aux observateurs non prévenus. Ainsi, d'après M. Alluard, directeur de l'Observatoire du Puy-de-Dôme, il n'est pas rare de voir, par un temps d'orage, des quantités de petites boules de feu rebondir sur le versant de la montagne. (*Causeries scientifiques*, 1876.)

[2] Nous extrayons encore ce passage : « L'orage qui a éclaté hier, 18 août, sur Paris, a été accompagné, par moments, d'une pluie torrentielle... Rue de Lyon, n° 35, la foudre a paru sous la forme

nous assurâmes, par une enquête, qu'il était exact.

Entre autres témoins, un élève de la pharmacie placée au rez-de-chaussée de cette maison nous déclara avoir vu tomber, à quelques mètres de distance, et au même instant, deux *globes de feu* d'un éclat tel qu'il en fut ébloui, et qui disparurent en atteignant le sol.

Bien que nous n'ayons pas vu, de Meudon, l'éclair qui a frappé ce point de Paris, à cause du rideau de pluie qui nous le cachait, l'observation de l'éclair *en chapelet* qui était tombé à Vaugirard, permet de penser que celui de la rue de Lyon devait être de la même nature. Du reste, ceux qui se produisaient au sein des nues présentaient, ainsi que nous l'avons mentionné, l'apparence de séries de points brillants plutôt que celle de traits lumineux uniformes.

§ 33. La quantité d'électricité répandue dans

d'un *globe lumineux*. Le tonnerre est tombé également dans la cour d'une usine, 7, rue Jules-César (à quelques pas du numéro 35 de la rue de Lyon). »

l'atmosphère était si grande, pendant cet orage, que des effets d'influence très curieux, analogues aux aigrettes et aux feux Saint-Elme, furent observés par M. Trécul, dans le quartier même visité par la foudre[1].

§ 34. Ce genre d'éclair nous paraît montrer la transition de la forme ordinaire de la foudre en traits sinueux ou rectilignes à la forme globulaire. On conçoit, en effet, que les grains de l'éclair puissent acquérir un certain volume et donner naissance à des globes de feu.

Nous avons donc conclu de cette observation que les globes fulminants qui tombent en plus ou

[1] Pendant l'orage qui survint dans la matinée du 18 août, dit M. Trécul, j'étais occupé, entre 7 et 8 heures, à écrire devant ma fenêtre ouverte. De grands éclats de tonnerre qui semblait tomber dans le voisinage, eurent lieu à plusieurs reprises. Durant les plus rapprochés, ou à peu près en même temps qu'eux, de petites colonnes lumineuses descendirent obliquement jusque sur mon papier. La longueur de l'une d'elles était d'environ 2 mètres... leur apparence était celle d'un gaz enflammé à contours mal définis... Aucune détonation n'eut lieu; seulement, près de s'éteindre, elles quittaient le papier avec un faible bruissement... » (*Comptes rendus*, t. LXXXIII, p. 478, 21 août 1876.)

moins grand nombre, accompagnés du bruit du tonnerre, et qui disparaissent immédiatement, peuvent être considérés comme dérivant d'un *éclair en chapelet.*

§ 35. Cette formation de grains lumineux, alternant avec des traits de feu, doit être une conséquence de l'écoulement du flux électrique au travers d'un milieu pondérable, et peut être comparée soit au chapelet de globules incandescents que présente un long fil métallique, fondu par un courant voltaïque, dont les extrémités restent un instant suspendues en fusion aux pôles de la pile, soit encore aux *renflements* résultant de l'écoulement de toute veine liquide.

De telles agglomérations de matière électrisée et lumineuse doivent être naturellement plus lentes à se dissiper que le trait lui-même qui les relie, et ainsi s'explique la persistance de l'éclair observé.

Cette observation s'est trouvée concorder avec une autre du même genre, cité par M. du Moncel, dans la description d'une série d'éclairs à sillon persistant. Pendant un orage à Londres, dans la

nuit du 19 au 20 juin 1857, on remarqua plusieurs éclairs « qui persistaient pendant quelques instants, et ne disparaissaient qu'après s'être comme fondus *en lumière granulaire* »[1].

Nous avons donc été conduit ainsi à proposer de réunir ces exemples d'éclairs d'un caractère particulier et de les classer, sous le nom d'*éclairs en chapelet*, parmi les phénomènes météorologiques[2].

§ 36. Depuis lors, plusieurs témoignages sont venus confirmer la réalité de l'existence de ce genre d'éclairs.

Dans une communication adressée à l'Académie des sciences, le 20 novembre 1876, M. E. Renou écrit que notre observation lui a rappelé un cas tout semblable dont il avait été témoin il y a longtemps.

« Pendant un violent orage qui se déclara dans la soirée du 20 juillet 1859, aux ponts de Braye,

[1] Comte du Moncel, *Notice sur le tonnerre et les éclairs*, p. 54.

[2] *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXXIII, p. 484, 21 août 1876.

commune de Sougé, à la limite des départements de la Sarthe et de Loir-et-Cher, la foudre, dit M. E. Renou, me parut tomber sur des peupliers d'Italie, situés au bord de la Braye, à 200 ou 250 mètres du lieu où je me trouvais; la foudre traça un sillon vertical, mais un peu sinueux, formé de boules presque tangentes, absolument comme un chapelet, et d'un éclat excessif[1]. »

M. Renou a apporté, en outre, un nouvel argument à l'appui de l'explication que nous avons donnée de l'origine des globes fulminants, en comparant le diamètre que lui ont paru avoir, à une distance déterminée, les grains de l'éclair en chapelet avec celui qu'ont ordinairement les globes fulminants vus de très près par quelques observateurs.

« Cette apparition, dit M. Renou, a été instantanée; mais, d'après l'impression qu'elle m'a laissée, j'ai évalué le diamètre des boules à la dixième partie du diamètre du soleil; un angle de 3′ à

[1] *Comptes rendus*, t. LXXXIII, p. 1002, 20 novembre 1876.

200 ou 250 mètres donnerait à ces sphères un diamètre de $0^{m},20$; c'est le diamètre qu'on a attribué à ces globes de feu qu'on a vus plusieurs fois traverser lentement des intérieurs d'appartement, sans atteindre les personnes présentes. »

§ 37. Le R. P. Van Tricht[1] relate que, pendant un violent orage, accompagné de grêle, qui eut lieu à Namur, le 24 juillet 1877, et qui fut considéré comme le plus fort du mois, un de ses collègues observant avec lui, « a fort distinctement aperçu un de ces *éclairs en chapelet* dont il a été question dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences* de Paris ».

§ 38. D'un autre côté, le savant regretté M. Daguin, professeur à la Faculté des sciences de Toulouse, nous a écrit le 28 juillet 1878 :

« En confirmation de la forme en *chapelet* dont vous citez des exemples, je puis vous dire avoir observé un éclair de cette structure allant des

[1] Voir l'*Étude des orages en Belgique*, par A. Lancaster (*Annuaire de l'Observatoire royal de Bruxelles*, p. 279, 1878).

nuages vers la terre. J'étais alors à l'observato de Toulouse, et j'avais mis ce cas au nombre c figures bizarres et très variées que présentent so vent les éclairs vus d'une station élevée. »

§ 39. Pendant un très fort orage qui éclata Rouen, le 28 juin 1879, M. R. Coulon « obser un éclair qui ne fut pas instantané; quoique fi forme, il présenta une série de scintillements do la durée s'éleva bien à une seconde. Un autre écl se manifesta sous une forme remarquable. D' nuage situé au-dessus de la vallée de Darnet sortit un trait de feu horizontal, aussi droit qu'u aiguille, *très renflé au centre*, et finissant en lueu sa durée fut instantanée et suivie d'un violent co de tonnerre. » (*L'Électricité*, 5 décembre 187

§ 40. M. Jacquez, bibliothécaire de la Directi générale des Postes et des Télégraphes, a obser pendant un orage qui éclata à Paris en 1885, *éclairs en chapelet* du genre de ceux que nous nons de décrire, dans la direction de Montrou

La foudre est en effet tombée, pendant l'un ces orages, dans ce quartier de Paris, et y a allu

un incendie local. L'enquête que nous avons faite pour savoir si la foudre avait été vue sous la forme globulaire ne nous a pas fourni de renseignements précis. Le fait de l'incendie allumé prouve toutefois qu'il y avait une grande quantité d'électricité en jeu; les incendies sont plus généralement déterminés par la foudre à l'état globulaire que par la foudre en traits linéaires.

§ 41. M. E. Daguin, professeur de physique au lycée de Bayonne, a écrit récemment au journal *la Nature* (3 septembre 1887) :

« Les éclairs en *chapelet* constituent un phénomène assez rare. Permettez-moi de porter à votre connaissance les résultats d'une triple observation que je viens de faire à cet égard. Les trois éclairs en question, allant de haut en bas, étaient formés de traits discontinus, allongés, légèrement renflés et ramifiés. Les deux premiers jaillirent, par un violent orage, vers le sud-ouest de Bayonne, le 24 juin, de 7h 30 à 8 heures du soir, et le dernier frappa, à Cap-Breton (Landes), un pin de la forêt voisine du lieu où j'observais, le 13 août dernier,

vers 3 heures du soir. Dans les trois cas, j'ai pu très nettement apprécier la structure de l'éclair, grâce à la persistance de l'impression lumineuse sur la rétine. »

§ 42. D'autres exemples d'éclairs analogues ont été publiés également en Angleterre :

« Dans la soirée du 16 août 1877, écrit M. B. Joule[1], un violent orage eut lieu à Southport... Parmi les plus brillants éclairs que j'observai, l'un d'eux présenta une apparence dont je n'avais jamais été témoin auparavant. Depuis son point de départ des nuages jusqu'à sa chute dans la mer, il semblait formé de petits fragments détachés qui lui donnaient l'aspect figuré ci-après (fig. 13). »

Cette dernière observation a été elle-même appuyée par une autre publiée dans le même recueil[2] :

[1] *Sur un éclair remarquable :* note lue par M. B. St. J. B. Joule à la Société de physique, etc., de Manchester (*Nature*, London, vol. XVIII, p. 260, 4 juillet 1878).

[2] *Nature*, London, vol. XVIII, p. 278, 11 juilllet 1878. *Forme remarquable d'éclair*, par E. J. Lawrence.

« Je puis confirmer, écrit M. E. J. Lawrence, ce fait que les éclairs peuvent présenter quelquefois



FIG. 13. — Éclair *ponctué* observé en Angleterre, à Southport, le 16 août 1877.

la forme *ponctuée*... Il y a environ quarante ans, pendant un orage accompagné d'une pluie abondante, dont je fus témoin à Ampton (Suffolk), les éclairs se succédaient, d'une manière incessante,

pendant plus d'une demi-heure, et le quart environ (autant que je puis m'en souvenir) présenta cette apparence exceptionnelle. Depuis cette époque, j'ai souvent cherché à la retrouver, mais je ne l'observai de nouveau qu'une seule fois, et encore n'y eut-il qu'un éclair de cette espèce parmi un grand nombre. Dans l'une et l'autre occasion, ces éclairs *ponctués* étaient d'un éclat éblouissant et présentaient la forme de courbes sinueuses sans angles vifs; l'une entre autres présenta celle d'un 8 presque parfait[1]. »

§ 43. La réalité de l'existence des *éclairs en chapelet* ou simplement *ponctués* (quand ils sont vus à une plus grande distance) nous paraît donc démontrée par les faits qui précèdent, et permet d'en

[1] On peut encore ranger dans la même classe d'éclairs celui qui a été observé dernièrement à Londres, pendant un violent orage, le 16 août 1887 :

« Vers 8h 1/2 du soir, un éclair remarquable a été vu dans le voisinage du quartier de Lambeth et de Westminster, sous la forme d'un trait étroit et fourchu qui s'est soudainement divisé en milliers de boules de feu, comme une fusée de feu d'artifice. » (*The Electrician*, 19 août 1887, p. 306.)

former une classe particulière sur laquelle nous appelons l'attention des observateurs.

Il serait en outre intéressant, dans le cas où on observerait des éclairs de cette nature, de constater s'ils ont été suivis de la chute de la foudre sous la forme globulaire, ce qui confirmerait les vues que nous venons d'exposer.

CHAPITRE II

DE LA GRÊLE

I

Phénomènes produits par des courants électriques de haute tension, présentant des analogies avec ceux qui accompagnent la production de la grêle.

§ 44. *Gerbe de globules aqueux.* — Si on plonge d'avance l'électrode négative d'une batterie de 400 couples secondaires environ dans un vase contenant de l'eau salée, et si on fait toucher l'électrode positive à la surface du liquide, il se produit une *gerbe* d'innombrables globules ovoïdes qui se succèdent avec une extrême rapidité, et

sont projetés à plus de 1 mètre de distance du vase où se fait l'expérience[1] (fig. 14).

C'est une sorte de *pulvérisation* de l'eau en



Fig. 14. — Gerbe de globules aqueux, produite, à la surface d'un liquide, par un courant électrique de haute tension, à l'extrémité d'une électrode métallique positive.

gouttelettes d'une certaine grosseur que produit la décharge électrique.

L'étincelle se présente, dans ce cas, à la surface

[1] *Comptes rendus*, t. LXXXII, p. 314.

du liquide sous la forme de couronne ou d'auréole à pointes multiples d'où jaillissent les globules aqueux. La métallité de l'électrode n'est pas néces-



Fig. 15. — Gerbe de globules aqueux, produite à la surface d'un liquide par un courant électrique de haute tension, avec une électrode positive, formée de papier humide.

saire pour obtenir cet effet; un fragment de papier à filtrer, humecté d'eau salée, en communication avec le pôle positif, produit également le phénomène (fig. 15).

§ 45. *Gerbe de globules liquides salins solidifiés.* — Si cette expérience de la *gerbe* était produite, avec une tension plus élevée, sur de l'eau ordinaire, dans une enceinte à très basse température, les gouttelettes projetées seraient évidemment solidifiées, et on aurait une reproduction artificielle plus complète du phénomène naturel.

Les difficultés de réalisation de cette expérience étant assez grandes, en raison du volume qu'il faudrait donner à l'enceinte refroidie, nous en avons fait une analogue, en opérant à la température ordinaire, et en prenant une solution saline concentrée (nitrate de potasse), chauffée près du point d'ébullition, de manière à ce que les gouttelettes projetées par la décharge électrique pussent se solidifier rapidement par le refroidissement à la température ambiante.

Le courant électrique étant amené à la surface de cette solution contenue dans un vase placé sur un support, élevé de 2 mètres environ au-dessus du sol, pour avoir une certaine hauteur de chute et donner aux gouttelettes le temps de se

solidifier, la gerbe se produit, et on obtient ainsi, par voie électrique, une grêle artificielle de nitrate de potasse.



FIG. 16. — Jets de vapeur, produits sur une surface humide, par un courant électrique de haute tension.

§ 46. *Jets de vapeur*. — Si, au lieu de rencontrer une couche profonde de liquide, le courant ne rencontre qu'une surface humide, telle que les parois mêmes ou le fond incliné de la cuvette, les effets calorifiques prédominent, l'auréole est plus brillante, et l'eau est rapidement transformée en vapeur (fig. 16).

L'action du courant diffère donc suivant la résistance qui lui est opposée, et l'on trouve ici un nouvel exemple de substitution réciproque de la chaleur et du travail mécanique résultant du choc électrique. Lorsque le travail représenté par la projection violente du liquide apparaît, il n'y a pas de chaleur ni de vapeur développées, et, quand aucun travail visible n'est accompli, lorsque le liquide n'est pas projeté, il y a chaleur engendrée et dégagement de vapeur.

§ 47. La formation de ces sillons lumineux, accompagnés de jets de vapeur, est *intermittente*. Chaque fois, en effet, que l'électrode en contact avec la surface humide a vaporisé les gouttelettes d'eau qui l'entouraient, le courant se trouve un instant interrompu ; mais une nouvelle portion de la masse liquide qui humectait cette surface afflue aussitôt, et le phénomène recommence, se produisant ainsi, d'une manière intermittente, jusqu'à l'épuisement de la décharge voltaïque.

II

Analogies entre les phénomènes précédents et ceux qui accompagnent l'apparition de la grêle. — Explication de la grêle.

§ 48. Ces effets mécaniques et calorifiques produits, sur des masses aqueuses ou des surfaces humides, par des décharges d'électricité dynamique de haute tension permettent d'expliquer le mode de formation de la grêle[1].

Le phénomène de la *gerbe de globules aqueux* (fig. 14 et 15) qui jaillit, lorsqu'un puissant courant électrique vient frapper la surface d'un liquide, montre qu'un effet analogue peut se produire

[1] *Comptes rendus*, 11 octobre 1875 et 31 janvier 1876.

lorsqu'un nuage ou un courant aérien électrisé pénètre dans une autre masse nuageuse à l'état naturel ou moins fortement électrisée.

Les nuages ne sont point, il est vrai, des masses liquides proprement dites, mais ceux des régions élevées sont composés, comme on le sait, de très fins et de très légers cristaux de glace, dont la cohésion est moins grande que celle de la glace ordinaire et qui peuvent être considérés comme équivalant à peu près à une masse liquide suspendue dans l'atmosphère. On conçoit donc que les décharges électriques puissent y produire un effet analogue à celui qu'elles produisent sur un liquide, et que l'eau de ces cristaux de glace, liquéfiée et pulvérisée sur les points où éclatent les décharges, soit lancée en gerbe de globules, comme dans notre expérience (fig. 17).

De plus, en raison de la basse température de l'ensemble du nuage lui-même ou des régions élevées dans lesquelles le phénomène se produit, ces globules peuvent être congelés instantanément et donner naissance à des grêlons.

L'expérience de la grêle artificielle de globules liquides salins, décrite ci-dessus (§ 45), montre bien la possibililé de cet effet.



Fig. 17. — Gerbe de globules aqueux, telle qu'elle peut se produire au sein d'une nuée ou d'un groupe de nuées, sous l'action des décharges de l'électricité atmosphérique.

§ 49. Suivant la plus ou moins grande agrégation ou densité de ces nuages, et selon la quantité d'électricité en jeu, les effets calorifiques ou mécaniques produits par le flux électrique peuvent alterner, se mélanger ou se substituer les uns aux

autres, de même que nous avons vu, dans les expériences décrites plus haut, le flux électrique, selon qu'il rencontre une masse aqueuse ou une surface simplement humide, déterminer, soit un effet mécanique tel que la projection de l'eau à l'état liquide, soit un effet calorifique, traduit par une abondante production de vapeur (§ 46, fig. 16).

Lorsque les effets calorifiques dominent dans l'action d'un courant électrisé au sein d'une masse nuageuse, l'eau n'est plus alors seulement pulvérisée, mais vaporisée par le flux électrique, et cette vapeur, immédiatement condensée en gouttelettes liquides, au sein du nuage froid, peut donner encore, dans ce cas, naissance à des grêlons[1].

§ 50. Nous avons donc été conduit ainsi à con-

[1] Il semble, au premier abord, qu'une matière aussi divisée que la vapeur d'eau ne pourrait produire que des grêlons infiniment petits. Mais il faut considérer qu'avant la congélation, la vapeur passe nécessairement par la liquéfaction, et que, si elle est produite brusquement et en abondance, elle peut se condenser rapidement en gouttes d'un certain volume contre les portions froides du nuage, de même qu'elle se condense en goutelettes contre la surface interne du couvercle d'un vase plein d'eau portée à l'ébullition.

sidérer la grêle comme *résultant de la congélation, dans les hautes et froides régions de l'atmosphère, de l'eau des nuages pulvérisée et vaporisée par les décharges électriques.*

§ 51. *Phénomènes électriques qui accompagnent les orages à grêle.* — L'intensité des phénomènes électriques que présentent généralement les orages à grêle, pendant lesquels les éclairs se succèdent d'une manière incessante et forment comme la décharge continue d'un puissant courant d'électricité dynamique à haute tension, montre l'importance du rôle que doivent jouer les effets mécaniques et calorifiques dont il s'agit dans la production de la grêle.

Lors des violents orages de grêle qui sévirent, en Suisse et en France, du 7 au 8 juillet 1875, huit à dix mille éclairs se succédaient par heure, en formant comme un immense incendie[1].

1 *Sur deux orages de grêle*, etc., par M. D. Colladon (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXXI, p. 104, 446 et 480). « Les

On se représente l'énorme quantité de chaleur et de vapeur d'eau que peut produire, au sein des nuages, un tel torrent d'électricité, quand on voit la quantité de vapeur qui se dégage dans les expériences citées plus haut[1].

phénomènes électriques, dit M. Colladon, étaient très remarquables sur les parties centrales du nuage à grêle; les éclairs se succédaient avec une telle rapidité, de minuit à 1 heure, que l'on comptait en moyenne deux à trois éclairs par seconde, ce qui ferait 8000 à 10 000 par heure.

« ... Partout où cet orage a passé, on a comparé la lueur de ses éclairs à celle d'*un immense incendie*, tant la clarté paraissait permanente. »

— Pendant un violent orage de grêle qui eut lieu, le 25 juillet 1877, dans les Hautes-Alpes, « ... les éclairs illuminaient le ciel d'une lueur ininterrompue ; les détonations se suivaient sans intervalle. » (Note de M. Le Capian, *Bulletin de l'Association scientifique de France*, p. 367, 9 septembre 1877.)

[1] La vaporisation de l'eau par les courants de haute tension se produit avec une rapidité dont on ne peut se faire une idée, quand on n'a pas été témoin des expériences; de grosses gouttes de vapeur condensée sont formées en un instant, au lieu de se former peu à peu, comme cela a lieu sous l'action de la chaleur seule.

Les grosses gouttes des pluies d'orage sont vraisemblablement produites de la même manière, par une vaporisation abondante résultant du passage d'un flux d'électricité. Il n'y a d'autre différence entre un nuage à grosses gouttes de pluie, et un nuage à grêle, si ce n'est que l'un se produit dans une région relativement basse de l'at-

§ 52. *Mouvements et formes des nuages à grêle.* — Les mouvements violents qui se produisent au milieu des nuages d'où tombe la grêle, la transformation rapide des cirrus en nimbus, s'expliquent aussi par l'action calorifique des décharges électriques; car les nimbus apparus subitement ne peuvent provenir que de la vaporisation rapide et de l'eau condensée d'une partie des cirrus.

Les déchirures multipliées des nuages à grêle, leurs formes déchiquetées, doivent également résulter de l'effet des décharges électriques, si l'on se reporte aux effets que produisent des courants de haute tension sur des matières humides (§ 119).

mosphère, et l'autre dans une région très élevée, par suite très froide. L'électricité agit donc, soit par son action calorifique en vaporisant l'eau qui se trouve dans le nuage, suspendue à l'état vésiculaire, soit en la pulvérisant, de manière qu'elle s'agrège en gouttes liquides ou solidifiées qui peuvent tomber sur la terre.

Il faut sans doute une grande quantité d'eau en suspension dans l'atmosphère pour que les décharges électriques puissent y produire cette pulvérisation qu'on obtient, dans nos expériences, par l'action de décharges de courants de haute tension sur l'eau à l'état liquide. On observe, en effet, que les nuages à grosse grêle sont extrêmement denses et opaques, au point d'obscurcir complètement le ciel, et renferment par suite une immense quantité d'eau.

§ 53. *Vent violent des orages à grêle.* — Le vent violent qui accompagne presque toujours les orages à grêle peut être attribué à la raréfaction que produit le courant électrisé vaporisant brusquement les masses humides qu'il rencontre sur son passage et à l'afflux de l'air environnant qui vient combler instantanément le vide formé.

§ 54. *Bruissement.* — Le bruissement qui précède ou accompagne la chute de la grêle est dû à la pénétration du flux électrique dans le nuage et à la pulvérisation ou vaporisation qui en résulte, de même que le bruissement produit par le passage d'un courant de haute tension, dans un liquide ou sur une surface humide, est dû à la projection en gerbe des globules aqueux ou à l'émission rapide des jets de vapeur[1].

[1] Dans le midi de la France, où les orages à grêle sont malheureusement fréquents et désastreux, voici comment les choses se passent, d'après les récits qui nous en ont souvent été faits par des témoins oculaires :

Un petit nuage blanc, insignifiant, en apparence, flotte, le matin,

§ 55. *Éclairs.* — Les éclairs, avec ou sans tonnerre, qui accompagnent les orages à grêle, proviennent de ce que, dans cette collision entre deux masses humides et d'une grande mobilité de formes, c'est tantôt l'une qui pénètre plus ou moins profondément l'autre, — de même que dans l'action d'un courant de haute tension à la surface d'un liquide, l'écoulement se produit sous forme de sillons lumineux accompagnés d'un simple bruissement, quand le liquide est rendu fortement

par un beau temps, dans le haut du ciel. Par cela même qu'il est à une grande hauteur, il semble n'avoir que de faibles dimensions ; en réalité, il peut offrir une étendue et un volume immenses. C'est un cirrus qui doit être très fortement électrisé : car la quantité et la tension de l'électricité contenue dans l'air croissent, comme on le sait, avec la hauteur.

Les paysans, instruits par l'expérience, disent en le voyant : « Ce nuage va nous jouer un mauvais tour ! » En effet, vers midi, l'air devient étouffant, on éprouve un malaise particulier ; les animaux semblent souffrir et donnent des signes de terreur. Vers le point même où planait ce nuage, le ciel s'obscurcit tout d'un coup ; il se forme comme un immense nimbus ; un bruissement sinistre se fait entendre ; les éclairs apparaissent et se succèdent rapidement, suivis du roulement continu du tonnerre. En même temps la grêle tombe, et souvent en gros grêlons qui hachent et détruisent toutes les récoltes.

négatif par une électrode complètement immergée, tandis que des étincelles bruyantes se produisent, si le liquide étant, au contraire, fortement positif, la décharge a lieu sur l'électrode négative.

§ 56. *Grêle sans manifestations électriques apparentes.* — On s'explique encore, par les mêmes analogies, comment la grêle peut se produire, sans manifestions électriques apparentes, et devoir néanmoins son origine à la présence de l'électricité.

On obtient, en effet, dans nos expériences, une production de vapeur, même sans phénomènes lumineux, lorsque la quantité d'électricité fournie par le courant de haute tension est faible. De même, il peut y avoir dans l'atmosphère, sans éclairs visibles, sans bruit de tonnerre perceptible, production de vapeur et congélation dans les régions froides, sous forme de petite grêle, lorsqu'il y a une faible quantité d'électricité en jeu [1].

[1] Ainsi qu'un fil métallique traversé par un courant électrique peut s'échauffer sans aller jusqu'à l'incandescence, un flux électrique dans l'air peut produire des effets calorifiques sans manifestations

§ 57. *Courte durée des chutes de grêle.* — L'intervalle de temps, quelquefois très court, que dure la chute de la grêle sur un même point, s'explique par la courte durée des décharges électriques elles-mêmes [1] et par le vent violent qui accompagne la nuée orageuse et l'entraîne rapidement sur d'autres points.

§ 58. *Bandes de grêle.* — La chute de la grêle en bandes quelquefois si étroites que, dans un même lieu, dans le même quartier d'une ville, des points séparés l'un de l'autre par une faible distance n'en reçoivent point de traces, alors que la partie médiane seule est frappée [2], — s'explique par la va-

lumineuses. On a même vu des bobines d'appareils télégraphiques brûlées, sans orage autrement appréciable que par des perturbations magnétiques. (Voir journal *l'Électricité* du 5 novembre 1880.)

1 Nous avons pu constater, à Paris, où les orages de grêle n'ont généralement qu'une très courte durée et une intensité relativement faible, des chutes de grêle qui ne duraient pas plus d'une demi-minute à une minute et succédaient presque exactement à l'apparition des éclairs et aux coups de tonnerre (en date du 28 mars, du 3 et du 25 mai 1876).

2 On a pu le constater également, à Paris, dans le cours de l'année 1876.

porisation et la congélation de l'eau autour des sillons mêmes tracés par les éclairs toujours plus développés en longueur qu'en largeur.

Quant aux longues et larges bandes de grêle qui couvrent une grande étendue de pays, elles résultent naturellement de la translation même des nuées orageuses sous l'action du vent qui les accompagne. La largeur de la bande correspond à celle du groupe des nuées, et sa longueur à la distance parcourue.

§ 59. *Bandes de pluie alternant avec des bandes de grêle.* — Les bandes de pluie comprises entre deux bandes de grêle peuvent résulter de ce que la masse interne des nuages froids dans lesquels s'opèrent les décharges étant réchauffée par la fréquence des éclairs, l'eau pulvérisée ou vaporisée ne fait que se condenser sous forme de pluie dans la partie médiane, tandis que la congélation peut avoir lieu encore sur les parties latérales et se continuer sur tout le parcours.

§ 60. *Intermittences et recrudescences.* — Les

intermittences et recrudescences qu'on observe, soit dans la chute de la grêle, soit dans les coups de vent qui l'accompagnent, sont tout à fait analogues à celles qu'on observe dans nos expériences, quand le courant électrique débouche sur une surface humide, et peuvent s'expliquer de la même manière.

Quant le nuage électrisé a réduit en vapeur une portion du cirrus dans lequel il pénètre, il se passe un instant avant qu'il rencontre une nouvelle masse à vaporiser; mais le reste du cirrus comble aussitôt le vide formé; une nouvelle décharge se produit, par suite une nouvelle projection de vapeur ou d'eau pulvérisée et la formation de nouveaux grêlons.

§ 61. *Forme ovoïde des grêlons.* — La forme ovoïde ou en pointe des grêlons, leurs aspérités ou protubérances, peuvent être attribuées à leur origine électrique; car, dans l'expérience de la *gerbe* (§ 44, fig. 15), les globules ont aussi une forme ovoïde, et l'étincelle d'où ils jaillissent a

l'aspect d'une couronne à pointes de flamme. Dans d'autres expériences où le courant agit sur une pâte humide qui conserve la forme résultant de l'action qu'elle a subie, on observe des cratères bordés de protubérances à pointes multiples tout à fait caractéristiques du passage du flux électrique.

§ 62. *Lueur des grêlons*. — La lueur quelquefois émise par les grêlons est due vraisemblablement à l'électricité. Bien que, dans nos expériences, on ne puisse distinguer si les globules aqueux ont une lueur propre ou causée par la réflexion de l'étincelle, il est probable que le flux électrique leur communique une courte phosphorescence, puisque avec une tension plus grande, l'air humide lui-même devient incandescent.

§ 63. *Structure des grêlons*. — La structure interne des grêlons est variée, comme on le sait ; les uns présentent une structure rayonnante à partir du centre, et semblent avoir été formés d'un seul jet ; les autres ont un noyau blanc opaque, recou-

vert de couches de glace alternativement opaques et transparentes.

La formation des premiers peut s'expliquer, ainsi que nous l'avons dit plus haut, par la production d'une *gerbe électrique* de globules aqueux immédiatement congelés sous le volume même qu'ils ont au moment où ils sont projetés, ou par la vapeur d'eau produite sous l'action calorifique des décharges, condensée en grosses gouttes, et congelée aussitôt dans l'enceinte du nuage à basse température.

Dans nos expériences, plus la quantité d'électricité fournie par le courant de tension est grande, plus les globules projetés sont gros; de même, dans la nature, les plus gros grêlons sont produits dans les orages où les manifestations électriques présentent le plus d'intensité[1].

1 Dans les orages en Suisse, déjà cités, « le volume des grêlons, M. E. Plantamour, atteignait des proportions rares dans nos latis, et un vent violent d'ouest les transformait en véritables proiles, brisant tout sur leur passage; ceux de la grosseur d'une noix, œuf de pigeon, et même d'un œuf de poule n'étaient pas rares.

veaux grêlons, ceux qui tournent encore peuvent se recouvrir d'une seconde couche de vapeur qui se congèle brusquement à l'état neigeux, et ainsi de suite [1].

§ 65. *Tourbillons de grêle*. — Quant à la cause de la formation de ces tourbillons de grêle, l'expérience que nous décrivons plus loin sous le nom de *spirales électrodynamiques* (§ 74, fig. 25, 26 et 27), et que nous invoquerons, pour expliquer le mouvement gyratoire des trombes et des cyclones, nous ont conduit à l'attribuer à l'action magnétique du globe.

L'apparition de la grêle se lie, en effet, comme on vient de le voir, à la présence dans les nuages de grandes quantités d'électricité dont les décharges

[1] On pourrait objecter que le R. P. Sanna-Solaro a obtenu artificiellement de petites masses d'eau congelées en une seule fois, sans addition successive de nouvelles quantités d'eau, et présentant néanmoins des couches concentriques alternativement opaques et transparentes.

Il en résulterait que le mouvement tourbillonnaire n'est pas absolument nécessaire pour rendre compte de ce genre de structure de grêlons. Mais alors leur formation rentrerait simplement dans le cas précédent que nous avons expliqué (§ 63).

constituent de véritables courants électriques, de courte durée, il est vrai, ou intermittents, mais ayant tous les caractères d'un flux puissant d'électricité dynamique.

Or, les courants électriques peuvent tourner sous l'influence d'une action magnétique, et avec d'autant plus de rapidité qu'ils traversent des conconducteurs plus mobiles. Quand ces courants rayonnent en tous sens, au sein d'un liquide, comme dans l'expérience dont il s'agit (§ 74), le mouvement gyratoire produit sous l'influence d'un aimant, et rendu visible par un tourbillon de poudre semi-métallique détachée de l'électrode, s'effectue en spirale avec une rapidité extraordinaire.

Les colonnes d'air nuageuses ou humides, fortement électrisées et mobiles dans tous les sens, doivent donc prendre de même un rapide mouvement gyratoire en spirale, sous l'influence du magnétisme terrestre, et entraîner en tourbillons la grêle qui accompagne les décharges.

§ 66. *Conclusion.*—Ainsi, l'électricité nous paraît

intervenir dans la production de la grêle par la variété de ses effets, soit mécaniques, soit calorifiques, soit magnéto-dynamiques. Le rôle des vents et des courants d'air est sans doute important; ils entraînent, divisent ou rassemblent, sur leur passage, les masses nuageuses électrisées; ils mettent en présence celles qui sont fortement chargées d'électricité et celles qui le sont moins; ils les élèvent vers les régions froides de l'atmosphère ou facilitent autour d'elles l'abaissement de température nécessaire à la congélation; ils les dirigent aussi, suivant la configuration du sol, vers les points où l'on observe que la grêle apparaît de préférence. Mais ce sont là des causes concourantes qui préparent seulement les conditions favorables à la production de la grêle, tandis que *l'électricité est*, selon nous, *la cause efficiente qui, par sa présence même dans les nuages et par la puissance instantanée de ses décharges, détermine la formation subite et la chute du météore*[1].

[1] *Comptes rendus*, t. LXXXII, p. 311, 31 janvier 1876.

CHAPITRE III

DES TROMBES ET DES CYCLONES

I

Expériences reproduisant, à l'aide de courants électriques de haute tension, des effets analogues à ceux des trombes et des cyclones.

§ 67. *Veine liquide électrisée. Mouvement gyratoire.* — Si on fait écouler une veine d'eau salée d'un entonnoir communiquant avec le pôle positif d'une batterie de 400 couples secondaires dans une cuvette où plonge d'avance le fil négatif et au-dessous de laquelle est placé un électro-aimant (fig. 18), on aperçoit, dès que le circuit voltaïque

est fermé, un filet lumineux, accompagné de quelques points brillants, à la partie inférieure de la



Fig. 18. — Veine liquide électrisée par le passage d'un courant électrique de haute tension, et animé d'un mouvement gyratoire, à sa partie inférieure, sous l'influence d'un pôle magnétique.

veine; des étincelles jaillissent avec bruissemen
à son extrémité, de la vapeur d'eau se dégage,

le liquide qui entoure le bas de la veine prend un mouvement gyratoire *en sens inverse de celui des aiguilles d'une montre, si le pôle de l'électro-aimant est boréal, et dans le même sens, si le pôle est austral.* Le mouvement est rendu visible par des corps légers répandus à la surface du liquide.

Si l'on raccourcit la veine de manière à éviter toute solution de continuité à sa partie inférieure, les signes électriques et lumineux disparaissent presque complètement; le liquide s'échauffe néanmoins, comme l'atteste une légère vapeur, et le mouvement gyratoire est encore plus net et plus rapide. En allongeant de nouveau la veine, les manifestations électriques et lumineuses reparaissent comme auparavant.

§ 68. *Mascaret électrique.* — En appuyant l'électrode positive contre les parois du vase d'eau salée communiquant avec le pôle négatif, on observe, outre des sillons lumineux et des jets abondants de vapeur, un violent remous du liquide, formant une sorte de *mascaret* électrique, qui

élève l'eau à 1 1/2 centimètre au-dessus de son niveau (fig. 19).

Si le flux rencontre sur certains points des inégalités de résistance, il peut se diviser et faire naître

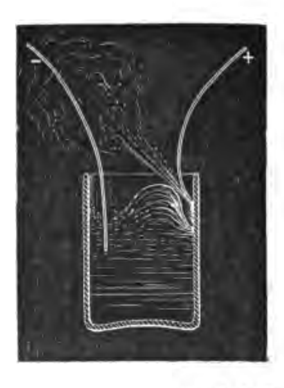


Fig 19. — *Mascaret électrique*, ou monticule liquide produit par un courant électrique de haute tension.

deux ou trois monticules aqueux, comme l'indique la figure 20.

§ 69. Ce phénomène est encore un résultat de l'effet calorifique produit par le courant sur la surface humide qu'il rencontre. Le liquide est repoussé

par la pression de la vapeur brusquement développée par le courant sur un point déterminé.

On peut rapprocher cet effet du souffle ou du vent produit sous l'influence d'un écoulement

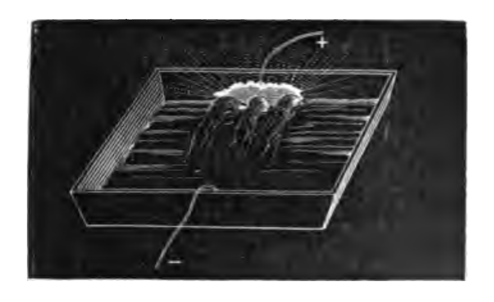


Fig. 20. — Vagues produites à la surface d'un liquide par un courant électrique de haute tension.

abondant d'électricité statique. Seulement, dans ce dernier cas, si la tension est plus grande, la quantité d'électricité est beaucoup moindre; aussi un flux d'électricité statique ne produit-il un effet de ce genre que sur l'air; il ne pourrait agir de même sur une masse liquide.

§ 70. *Pompe voltaïque.* — Des effets remarquables d'aspiration peuvent être produits aussi par le flux électrique. Si on introduit le fil positif dans un tube capillaire, en laissant toutefois un intervalle libre d'un demi-centimètre environ à son extrémité, on voit, aussitôt qu'on plonge le tube électrode dans l'eau salée, le liquide s'élever, avec une très grande rapidité, à une hauteur de 25 à 30 centimètres, et retomber en nappe sillonnée de traits brillants et de jets de vapeur (fig. 21).

On constitue ainsi une *pompe voltaïque*, dans laquelle le vide formé résulte de la production et de la condensation de la vapeur autour de l'électrode.

L'ascension du liquide est si rapide, malgré la résistance opposée par l'exiguïté du canal, qu'on aperçoit une gouttelette lumineuse à l'extrémité supérieure du tube, aussitôt que la partie inférieure touche le liquide.

§ 71. Le courant de la machine rhéostatique *de quantité*, décrite plus loin (§ 116), produit ces effets d'ascension d'une manière encore plus frappante



Fig. 21. — *Pompe voltaïque :* ascension d'une colonne de liquide, sous l'action d'un courant électrique de haute tension.

que le courant de tension direct de la batterie secondaire.

Les électrodes étant placées dans les mêmes conditions, l'eau est élevée dans le tube par brusques saccades, accompagnées d'un bruit sec particulier, sans développement d'action calorifique aussi marquée que dans le cas précédent. On obtient ainsi une sorte de *bélier hydro-électrique* dont les effets sont produits par une action mécanique de l'électricité.

§ 72. *Jet d'eau électrique.* — Bien plus, en employant toujours le courant de quantité fourni par le même appareil, si on raccourcit le tube capillaire par lequel le courant débouche dans le liquide, de manière à le réduire à 2 ou 3 centimètres de longueur, et à limiter ainsi dans un espace exigu la quantité de matière soumise à l'action directe du courant, il se produit un véritable *jet d'eau* continu, formé de gouttelettes extrêmement fines qui s'élèvent à plus de 1 mètre de hauteu (fig. 22).



FIG. 22. — *Bélier hydro-électrique :* jet d'eau produit par les étincelles de la machine rhéostatique, disposée en *quantité*.

Le passage des étincelles par le tube, immergé dans le liquide, est accompagné de chocs violents et d'un bruit très intense; l'eau devient trouble en se pulvérisant, et la force mécanique en jeu dans cet étroit espace est si considérable qu'elle détermine quelquefois la rupture du bassin en verre dans lequel se fait l'expérience.

§ 73. *Cônes liquides*. — Ces effets d'aspiration produits par le courant électrique peuvent se présenter encore sous une autre forme. Si on emploie une tension plus élevée, celle de 800 couples secondaires, et si on approche l'électrode de la surface de l'eau distillée, le liquide se soulève quelquefois en forme de *cône* avant que l'étincelle éclate. Ce phénomène, peu marqué avec l'électricité statique, mais entrevu néanmoins par Peltier, et observé depuis longtemps sur l'huile mieux que sur l'eau elle-même, avec ce genre d'électricité, est ici beaucoup plus marqué, à cause de la plus grande quantité d'électricité en jeu.

Si on forme l'électrode d'un pinceau humide

d'amiante ou de papier à filtr
du petit cône aqueux qui re:
mité de l'électrode pendant l
une couronne de vapeurs a



Fig. 23. — Cône liquide et jets de
mité d'une électrode de papier
électrique de haute tension.

de l'effet calorifique développ
passage dans le liquide (fig.

§ 74. *Spirales électro-dynan*
suivante, que nous avons dé

[1] *Bibliothèque universelle de Genève*, t.

pas une tension électrique aussi grande que les précédentes. Elle peut être réalisée avec une batterie secondaire de 10 à 20 couples ou avec une pile de 15 à 20 éléments de Bunsen.

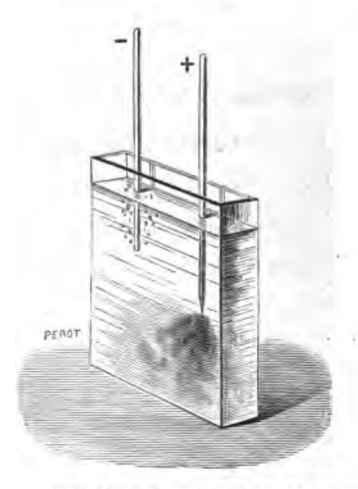


Fig. 24. — Nuage d'oxyde produit, dans un voltamètre, à l'extrémité d'une électrode positive en fil de cuivre.

L'électrode positive est ici un fil de cuivre, le liquide du voltamètre est de l'eau acidulée au 1/ par l'acide sulfurique. Tandis que dans les con tions ordinaires de l'électrolyse de l'eau avec

voltamètre, sous l'action d'un courant faible, le fil positif se recouvre d'une couche d'oxyde qui se

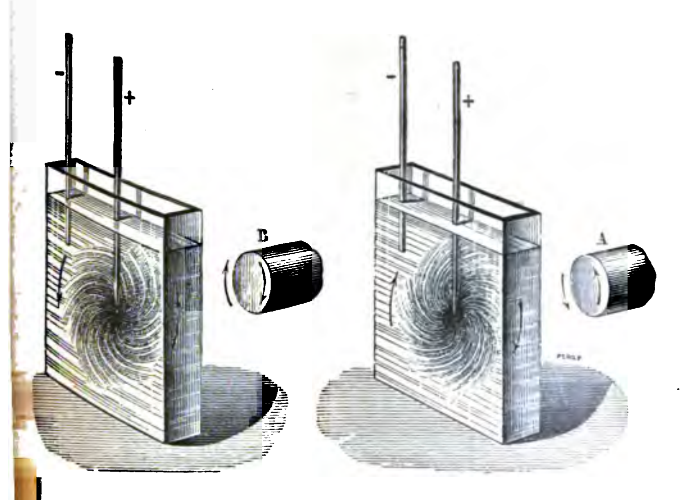


Fig. 25 et 26. — *Spirales électro-dynamiques :* mouvement gyratoire d'un nuage d'oxyde, à l'extrémité d'une électrode de cuivre, sous l'influence d'un pôle magnétique.

Les flèches tracées autour des spirales indiquent le sens du mouvement gyratoire sous l'influence de l'aimant, et les flèches tracées autour de l'aimant indiquent le sens des courants magnétiques; B est le pôle boréal, A est le pôle austral.

(sout lentement dans le liquide, il se manifeste ı phénomène différent, si on emploie un cou- r ıt d'une certaine tension.

Le siège principal de l'oxydation se trouve transporté à l'extrémité du fil. Un sifflement analogue à celui que produit un métal rougi plongé dans l'eau froide se fait entendre, et l'extrémité du fil donne naissance à un jet d'oxyde très divisé qui s'échappe en flocons abondants et ne se dissout pas dans le liquide (fig. 24).

Si l'on approche alors le pôle d'un aimant de l'extrémité de l'électrode, le nuage d'oxyde prend un mouvement gyratoire très rapide dans un sens ou dans l'autre suivant le pôle de l'aimant que l'on présente. La rotation s'effectue conformément aux lois d'Ampère, *en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre, en présence d'un pôle boréal* (fig. 25) *et dans le même sens que celui des aiguilles d'une montre, en présence d'un pôle austral* (fig. 26).

§ 75. On peut donner encore à cette expérience la disposition représentée par la figure 27. Une cuvette en verre ou en porcelaine est placée a' dessus d'un électro-aimant et remplie d'eau aci lée ; un fil métallique quelconque, en communi

tion avec le pôle négatif d'une pile de 15 éléments de Bunsen, plonge d'avance dans le liquide. Le fil positif en cuivre, tenu à la main, est plongé

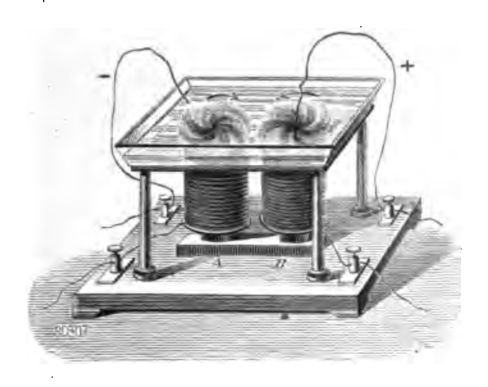


Fig. 27. — Appareil montrant simultanément deux spirales électro-dynamiques de sens contraire, formées sous l'influence d'un-électro aimant.

successivement dans le liquide au-dessus de chaque pôle de l'électro-aimant.

Le nuage d'oxyde se produit, les spirales se léveloppent, et comme l'oxyde formé ne se dissout pas immédiatement dans le liquide, mais

flotte dans un état de division extrême à sa surface, les deux sortes de spirales de sens différent restent quelques instants tracées à la surface du liquide, après que le courant a cessé d'agir, et conservent même le mouvement dont le liquide était animé sous l'influence magnéto-électrique.

M. Silvanus P. Thompson a obtenu, depuis, des spirales analogues en faisant agir sur de la limaille de fer un aimant traversé par un courant électrique, et les a fixées de même que d'autres fantômes magnétiques produits par des actions électro-dynamiques [1].

L'expérience décrite ci-dessus peut se rattacher à plusieurs autres sur la rotation des liquides traversés par des courants autour des aimants, telles que celles de MM. Wartmann, Jamin, etc. Mais ce qui la caractérise plus particulièrement, c'est la rotation en forme de courbes spirales, par suite de l'action magnétique qui s'exerce sur les courants rayonnant autour d'un même point

[1] *La Nature*, 17 août 1878.

formé par l'extrémité de l'électrode; et la netteté de ces spirales est d'autant plus grande que l'électrode fournit elle-même, par sa désagrégation, la matière solide nécessaire pour rendre visible la marche des courants au sein du liquide.

II

Analogies des phénomènes décrits ci-dessus avec ceux des trombes et des cyclones. — Explication des trombes et des cyclones.

§ 76. Les phénomènes que nous venons de décrire offrent de grandes analogies avec ceux des trombes et des cyclones, et montrent l'importance du rôle que doit jouer l'électricité dans ces grands phénomènes naturels.

L'expérience représentée (fig. 18), dans laquelle une veine liquide, fortement électrisée, s'écoule au-dessous d'un aimant, reproduit, dans des proportions infiniment réduites, il est vrai, mais avec leurs traits les plus caractéristiques, les prin

cipaux effets des trombes, le ***bruissement*** qu'elles font entendre, le brouillard qui se forme autour d'elles, les traits lumineux ou les éclairs silencieux

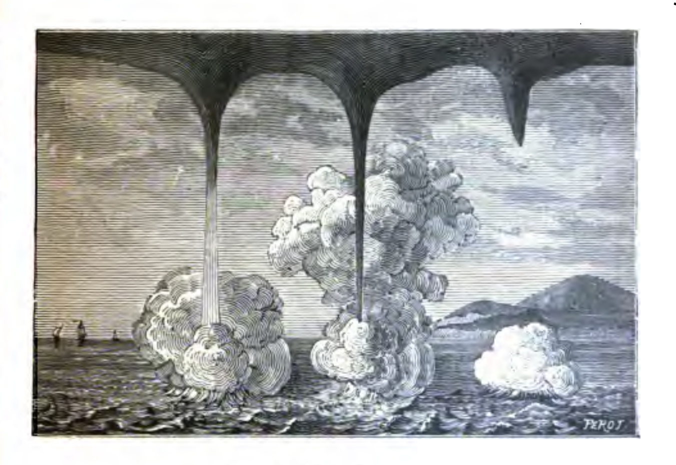


FIG. 28. — Trombes marines.

qui les sillonnent, les globes de feu qui apparaissent quelquefois à leur extrémité[1], le bouillon-

[1] On observe, en effet, dans cette expérience, au point où la veine encontre la surface du liquide, et autour de l'étincelle, de petits glo-

nement des eaux quand elles atteignent la surface de la mer : de sorte que ces météores peuvent être comparés à des *électrodes* positives de liquide ou de vapeur, desquelles s'échappent, vers le sol ou la mer, les puissants courants électriques des nuées orageuses (fig. 28)[1].

§ 77. *Mouvement gyratoire des trombes.* — Cette expérience nous a conduit, en outre, à attribuer le *mouvement gyratoire* des trombes[2] à l'écoulement

bules aqueux lumineux, en même temps que de la vapeur d'eau et de l'eau pulvérisée.

Dans la description d'une trombe qui se manifesta à Assonval (Pas-de-Calais), le 6 juillet 1822, il est relaté qu'on observa « des globes de feu sortant de temps en temps de cette trombe. On entendait une explosion à chaque sortie d'un globe de feu ou de vapeur. » (Zurcher et Margollé, *Trombes et Cyclones*, 1883.)

[1] M. Ferrière a observé, le 21 novembre 1876, à Antibes, trois trombes, sous forme de trois colonnes descendantes, noires comme de l'encre. La première colonne se retira peu à peu vers le nuage, restant unie à la mer par une *gaine lumineuse*. La deuxième colonne éprouva le même phénomène de retrait. De la zone pluviale jaillit soudain un immense éclair ; le cylindre noirâtre de la dernière trombe se retira également vers le nuage. *(Comptes rendus*, 27 novembre 1876.)

[2] La plupart des trombes sur terre ou sur mer sont accompagnées, comme on le sait, d'un mouvement gyratoire. A l'approche d'une

du flux électrique sous l'influence du magnétisme du globe; car ce mouvement a lieu précisément de la même manière que dans l'expérience dont il s'agit, c'est-à-dire en *sens inverse de la rotation des aiguilles d'une montre pour un observateur placé dans l'hémisphère boréal, et en sens direct pour un observateur placé dans l'hémisphère austral.*

§ 78. *Mouvement gyratoire des cyclones.* — Si l'on considère que ce sens est aussi celui du mouvement des *cyclones,* — que la rotation de ces grands courants aériens a lieu en *spirale,* d'après les diagrammes de nombreux navigateurs[1], à l'instar des mouvements électrodynamiques *en spirale* que nous avons observés lorsqu'un flux

trombe, « la surface de la mer commence à s'agiter, on voit l'eau écumer et tourner doucement jusqu'à ce que le mouvement rotatoire se soit accéléré... » (Dampier, *Voyage autour du monde.)*

[1] Voir *Notes sur la forme des cyclones dans l'océan Indien,* etc., par Meldrum, directeur de l'Observatoire de Maurice. D'après M. Wil-
ı, directeur de l'Observatoire météorologique de Calcutta, la forme
s cyclones du golfe du Bengale serait également plutôt spirale que
rculaire.

électrique, s'échappant d'un seul point, peut rayonner dans tous les sens au-dessus d'un aimant (§ 74-75); si l'on remarque en outre que ces mouvements gyratoires sont acccompagnés des manifestations électriques les plus intenses, à leur naissance dans les régions intertropicales[1], — et

[1] Voir les ouvrages de Reid, de Piddington, de A. Poey, de la Havane (*Tempêtes électriques : Annuaire de la Société météorologique*, 1855), de Marié-Davy (*Les Mouvements de l'atmosphère et des mers*, Paris, 1877) ; de A. Le Gras, Bridet, Roux, Zurcher et Margollé (*Trombes et Cyclones*), etc.

Dans les régions méridionales de la France, les manifestations électriques présentent aussi quelquefois une grande intensité.

Pendant la nuit du 7 au 8 juin 1885, un violent cyclone a traversé le département des Landes. On a vu, sous l'influence du vent qui accompagnait le météore, les arbres s'abattre et se coucher à terre. Des éclairs se produisaient à la fois dans toutes les directions, et semblaient même converger les uns vers les autres. Le ciel, d'après les témoins oculaires, *était tout en feu*. (Observation communiquée par M. Francis Planté.)

Aux États-Unis, on observe souvent des ouragans dans lesquels l'électricité joue un rôle capital.

M. C.C. Haskins écrivait le 19 juin 1886 (voir *la Lumière électrique*, 8e année, t. XX, p. 571) :

« Le 11 mai 1886, la ville de Kansas (Missouri) fut victime d'un cyclone d'une violence inouïe. Les premiers symptômes se mai festèrent vers 11 heures du matin. Je venais de terminer quelqu opérations de mesure, pendant lesquelles l'aiguille du galvanomè

que les *cyclones* semblent se développer autour d'un point, appelé *l'œil du cyclone,* qui est un véritable foyer d'électricité, — il est permis, croyons-nous, d'attribuer ces redoutables météores à la *rotation magnéto-dynamique des courants électriques de l'atmosphère, auxquels les nuages servent de conducteurs mobiles et dont le mouvement se communique aux masses d'air qui les entourent*[1].

avait parfois des écarts étranges. L'air était lourd et étouffant ; l'obscurité était si grande qu'il était impossible de voir à travers une rue étroite. Les éclairs se succédaient, et le vent s'engouffrait avec bruit dans les rues les plus larges. Les dégâts ont été terribles. Le lendemain, 12 mai, un ouragan violent, de l'espèce des *tornados*, passait sur les États d'Indiana et d'Illinois. Le 14, un nouvel ouragan se déchaînait près du lac Érié... De Fort-Wayne jusqu'à Lima, en Ohio, *le ciel était en feu*, et la pluie tombait comme une nappe d'eau. »

1 Bien que le mouvement gyratoire des cyclones ait été généralement attribué, par la plupart des auteurs qui se sont occupés de cette question, à la rencontre de vents de direction contraire ou animés de vitesse différentes, nous ajouterons cependant que Reid lui-même, l'un des auteurs des *Lois des tempêtes*, avait présumé « que l'électro-magnétisme avait peut-être quelque rapport avec le caractère rotatoire des tempêtes et leurs mouvements opposés dans les hémisphères différents... » (H. Piddington, *Guide du marin sur la loi des tempêtes*, p. 171 ; Paris, 1859).

§ 79. Nous ajouterons, à l'appui de ces considérations, comme nous l'avons déjà fait à propos des tourbillons de grêle qui ont, selon nous, la même origine (§ 65) que la vitesse avec laquelle ces mouvement électro-dynamiques se produisent dans nos expériences est très grande, — le courant électrique n'étant point emprisonné dans des conducteurs métalliques et pouvant se répandre librement, d'un seul point, dans tous les sens, au sein d'un liquide.

En voyant la rapidité de ces mouvements, on conçoit la puissance que peuvent acquérir ceux des courants aériens éminemment mobiles, chargés d'une grande quantité d'électricité, rayonnant également dans tous les sens, au sein de l'atmosphère, et transformés par le magnétisme du globe en mouvements gyratoires.

Nous ne considérons point ici, bien entendu, le mouvement de translation, ou la trajectoire des cyclones, qui dépend de la direction des vents réguliers supérieurs, combinée avec le mouvement de rotation du globe.

§ 80. *Trombes en spirale.* — L'appendice nuageux qui constitue les trombes se présente quelquefois sous une forme en spirale.



FIG. 29. — Trombe en spirale, avec gerbe aqueuse à son extrémité, observée à Nice, en 1789.

Une trombe de ce genre fut observée par M. Michaud, à Nice, le 6 janvier 1789, et décrite dans les *Mémoires de l'Académie des sciences de Turin* (fig. 29)[1].

[1] Voir Peltier, *Observations et Recherches expérimentales sur les auses qui concourent à la formation des trombes*, p. 249. Paris, 1840.

Le capitaine Beechey en a cité un autre exemple observé pendant son voyage dans l'océan Pacifique : « Un globe de feu se précipite dans la mer ; les éclairs étaient très nombreux ; la colonne de la trombe descendit sous la forme d'une spirale. La gyration était en sens inverse de la rotation des aiguilles d'une montre[1]. »

Si l'on possédait un certain nombre d'exemples de trombes de cette nature, et si le sens de la spirale en était reconnu toujours le même, on pourrait attribuer encore cette forme, de même que le mouvement gyratoire, à l'action du magnétisme terrestre.

Dans tous les cas, on peut s'expliquer la formation d'une spirale par le mouvement de réaction dû à l'écoulement du flux électrique, de même que dans les expériences que nous avons citées plus haut (§ 2 et § 4)[2].

[1] Noad, *Text-Book of electricity*, p. 98. London, 1879.

[2] Telle est aussi la cause des éclairs en hélice dont plusieurs auteurs ont cité des exemples, et des spirales fulgurantes dont on trouvé la trace sur des arbres foudroyés. (W. de Fonvielle, *Éclairs*

§ 81. L'expérience décrite plus haut prouve encore que les trombes, alors même qu'elles ne sont accompagnées d'aucun signe électrique, peuvent être néanmoins chargées d'électricité, et devoir leur mouvement gyratoire à la présence même de cette électricité. C'est qu'elles forment, dans ce cas, un conducteur assez parfait pour que le flux élec-

tonnerre, 1874. Coulvier-Gravier, *Recherches sur les météores*, 1859 : *La Nature*, 7 avril 1877.) M. W. de Fonvielle en a signalé plusieurs cas. Nous en avons nous-même observé un double exemple, lors d'un violent orage qui éclata sur Versailles, dans la nuit du 13 au 14 juillet 1880. La foudre ayant frappé plusieurs arbres dans le bois de Satory et des Gonards, nous vîmes, sur l'un d'eux, que la foudre avait tracé une spire d'hélice *sinistrorsum*, et, sur un autre, une demi-spire d'hélice *dextrorsum*.

M. Ch. Moussette a découvert récemment (voir *Comptes rendus*, 5 juillet 1886, t. CIII, p. 31, et *la Lumière électrique*, 10 septembre 1887), en agrandissant des épreuves photographiques d'éclairs qu'il avait obtenues, des spirales très nettes formées par ces éclairs, et en a comparé l'aspect à celui que présentent de nuit les pièces d'artifice dont le mouvement de translation est accompagné d'un mouvement gyratoire. M. Moussette a observé que, sur deux éclairs, saisis à quelques minutes d'intervalle et fixés sur le même cliché, l'enroulement des spires n'était pas de même sens ; dans l'un, il était *dextrorsum ;* dans l'autre, formé de deux branches, la branche verticale était *sinistrorsum ;* la seconde branche, arquée en retour, était une hélice *dextrorsum*.

trique puisse s'écouler sans se transformer en chaleur et en lumière.

§ 82. La même expérience établit enfin que les trombes doivent être chargées d'électricité positive; car, si elles étaient négatives, le mouvement gyratoire aurait lieu en sens inverse de celui qu'on observe dans chaque hémisphère.

§ 83. La formation même des trombes ou la descente de ces appendices nuageux vers le sol a été rapportée, avec raison, par Brisson[1] et Peltier[2] à une attraction électrostatique entre les nuages et la terre. A cette force attractive bien naturelle peut s'ajouter une action de transport, comme l'électricité dynamique en offre de nombreux exemples, et qui tend à faciliter l'écoulement de l'eau du nuage électrisé. On conçoit qu'un nimbus, très dense et fortement chargé d'électricité, puisse donner naissance à la chute d'une colonne aqueuse,

[1] Brisson, *Traité de physique*, t. III, p. 418. Paris, 1803.
[2] Ath. Peltier, *Observations et Recherches expérimentales sur les causes qui concourent à la formation des trombes*. Paris, 1840.

lorsqu'il passe à une distance suffisamment rapprochée du sol ou de la mer.

§ 84. *Ras de marée et seiches.* — Les *ras de marée* qui accompagnent souvent les cyclones[1], les *seiches* des lacs de la Suisse, consistant en une élévation soudaine des eaux sous forme de vagues ou d'ondulations, particulièrement aux extrémités rétrécies des lacs, et qui se produisent surtout pendant les violents orages[2], s'expliquent aussi par les actions électriques, comme Bertrand, du reste, et d'autres observateurs l'avaient pensé.

[1] « ... Cette coïncidence du ras de marée avec le cyclone est très remarquable ; il n'est pas d'exemple d'un ouragan ayant frappé la Réunion, sans qu'il ait été précédé d'un phénomène de cette nature. » (J. Rambosson, *Histoire des météores*, p. 243.)

Piddington cite un cas observé à Ramsgate, « de l'élévation soudaine et de la baisse d'une colonne de marée, dans ce port, en août 1846 ; elles eurent lieu par trois fois, par ondulations inégales, pendant un fort orage, et juste pendant une forte décharge de ce qu'on appelle le choc en retour du fluide électrique. » (*Guide du* *rin*, p. 136.)

[2] Voir les travaux de M. Forel sur ce sujet : *Bibliothèque univer-e de Genève*, août et septembre 1878.

L'expérience que nous avons décrite sous le nom *mascaret électrique* (§ 68, fig. 19 et 20), dans laquelle un courant électrique de haute tension fait naître, sur les bords de la surface d'un liquide, une ou plusieurs petites vagues, relativement assez élevées au-dessus de son niveau, montre qu'un flux d'électricité atmosphérique peut repousser ou soulever des masses liquides comme un souffle ou un vent impétueux, et prouve encore l'origine électrique de ces phénomènes.

§ 85. Le phénomène d'ascension d'une colonne liquide, produit par l'écoulement même d'un puissant flux électrique, que nous avons décrit plus haut sous le nom de *pompe voltaïque* (§ 70, fig. 21), les cônes liquides formés au-dessous d'une électrode qui amène le courant à la surface d'un liquide (§ 73) permettent d'expliquer les effets d'*aspiration* très énergiques produits par les trombes[1], et de conce-

[1] M. Dufour, de Genève, vient de donner la description d'une trombe qui s'est montrée sur le lac Léman, le 19 août 1887, à 7h 1 du matin. La trombe s'est formée sur le lac, par un vent du su ouest; en touchant terre, elle a disparu : sa pointe est remont

voir, en particulier, comment, dans les trombes d'apparence tubulaire, cette aspiration, s'exerçant sur toute la longueur de la colonne électrisée, peut élever l'eau à une hauteur indéfinie, ce qui a fait désigner aussi ces météores sous le nom de *pompe* ou de *siphon*, dans certaines parties du monde. L'eau aspirée peut provenir des parois du canal vaporeux lui-même, et l'on s'explique ainsi l'observation faite sur l'absence de sel dans l'eau retombant des trombes marines[1].

vers le ciel, donnant, dit M. Dufour, « le spectacle d'un serpent qui retire sa queue ». Un bateau à vapeur qui naviguait sur le lac a vu apparaître et disparaître la trombe ; il a déclaré que l'eau *montait* dans la trombe. C'est aussi l'apparence du phénomène observé par un cantonnier du chemin de fer qui travaillait sur la voie, à quelques mètres du point où la trombe a abordé le rivage. (*La Nature*, 3 septembre 1887. — *Comptes rendus*, 29 août 1887.)

[1] Dans des expériences très intéressantes, M. Weyher a imité récemment, par voie mécanique, les effets d'aspiration des trombes. (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, et *Cosmos*, 9 juillet 1887.)

Ces expériences montrent qu'on peut reproduire mécaniquement des effets analogues à ceux des trombes, de même qu'on peut imiter mécaniquement divers effets de l'électricité, comme nous en avons cité de nombreux exemples. (*Recherches sur l'électricité*, 1879, et 1883, § 324 à 336). Mais nous pensons que, dans la nature, c'est l'électricité elle-même, jointe à l'action du magnétisme ter-

§ 86. *Conclusion.* — Les phénomènes produits par l'électricité statique présentent aussi, à un faible degré, des effets d'aspiration et d'évaporation dont Brisson et Peltier avaient déjà signalé les analogies avec les trombes. Mais ceux que nous avons observés avec de forts courants d'électricité dynamique, réunissant à la fois la *quantité* et la *tension*, paraissent se rapprocher plus encore des conditions de la nature, et nous croyons pouvoir conclure de cette étude expérimentale que les *trombes et les cyclones sont de puissants effets électrodynamiques produits*

restre, qui produit les phénomènes mécaniques des trombes, et que ces phénomènes ne proviennent pas des tourbillons formés fortuitement par des courants d'air. On sait d'ailleurs que les trombes apparaissent souvent par un temps calme.

Les expériences de M. Weyher imitent aussi les tourbillons de poussière qui se forment accidentellement à la surface du sol. Ceux-ci n'ont pas ordinairement une origine électrique. On les voit se produire, en effet, sous l'influence d'une masse d'air tourbillonnante provenant de la rencontre de deux courants d'air opposés ou animés de vitesses différentes.

Cependant d'autres tourbillons de poussière, tels que ceux observés par le docteur Baddeley, dans les Indes, ont, au contraire, une origine électrique. (Piddington, *Guide du marin*, p. 265.)

par les forces combinées de l'électricité atmosphérique et du magnétisme terrestre[1].

[1] *Comptes rendus*, t. LXXXII, p. 220, 17 janvier 1876.

CHAPITRE IV

DES AURORES POLAIRES

I

Expériences relatives à l'imitation des aurores polaires; phénomènes lumineux produits par des courants électriques de haute tension, au contact de surfaces humides.

§ 87. *Couronnes, arcs, rayons et mouvements ondulatoires.* — Si l'on met l'électrode positive d'une batterie secondaire de 400 couples en contact avec les parois humides d'un vase d'eau salée où plonge d'avance l'électrode négative, on observe, suivant la distance plus ou moins grand du liquide, soit une *couronne* formée de particule

lumineuses disposées en cercle autour de l'électrode (fig. 30), soit un *arc* bordé d'une frange de rayons brillants (fig. 31), soir une *ligne sinueuse animée d'un rapide mouvement ondulatoire*[1] (fig. 32).



Fig. 30. — Couronne lumineuse, produite sur une surface humide par un courant électrique de haute tension.

Un bruissement particulier, sans cesse croissant, se fait entendre, et de la vapeur d'eau s'échappe,

[1] *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXXII, p. 626, 13 mars 1876.

en jets rapides, au-dessus des traits de feu, comme si elle avait une certaine pression.

Si l'on enfonce encore plus le fil, il se produit



Fig. 31. — Arc lumineux, avec rayons, produit sur une surface humide, par un courant électrique de haute tension, à l'extrémité de l'électrode positive.

un anneau lumineux fermé ; à cet anneau en succède un autre, et l'on a ainsi une génération d'ondes brillantes, à l'intérieur desquelles le liquide est agité par un vif mouvement tourbillonnaire.

On voit même apparaître quelquefois, autour des tourbillons liquides, de petits anneaux lumineux irréguliers, détachés du verre et de l'électrode.



FIG. 52. — Arc sinueux, animé d'un mouvement ondulatoire, produit contre une surface humide, par un courant électrique de haute tension.

Si le vase dans lequel on opère est un tube en U, ou ne renferme qu'une petite quantité de liquide, toutes ces ondes finissent par se confondre, le liquide devient complètement lumineux, et entre dans une violente ébullition.

Pendant ce temps, la déviation d'une aiguille aimantée, placée près du circuit, éprouve de continuelles variations.

II

Analogies des phénomènes qui précèdent avec ceux des aurores polaires. — Explication des aurores polaires.

§ 88. Les expériences que nous venons de décrire, et dans lesquelles le flux électrique se trouve en présence de masses aqueuses ou de surfaces humides, comme dans l'atmosphère, présentent des phénomènes tout à fait analogues à ceux des aurores polaires[1] (fig. 33).

[1] Voir les descriptions d'aurores polaires dans les ouvrages ou travaux de A. de Humboldt *(Tableaux de la nature, Cosmos)*, Bravais, Lottin, etc. *(Voyages en Scandinavie)*, Arago *(Notices scientifiques)*, Piazzi-Smyth *(Observations faites à l'Observatoire royal d'Édimbourg*, 1877, t. XIV, pl. V, VI et VII), Capron *(Les Aurores boréales ;*

§ 89. *Couronnes et arcs avec mouvements ondulatoires*. — On y reconnaît, en effet, malgré l'exiguïté des proportions, les couronnes, les arcs lu-

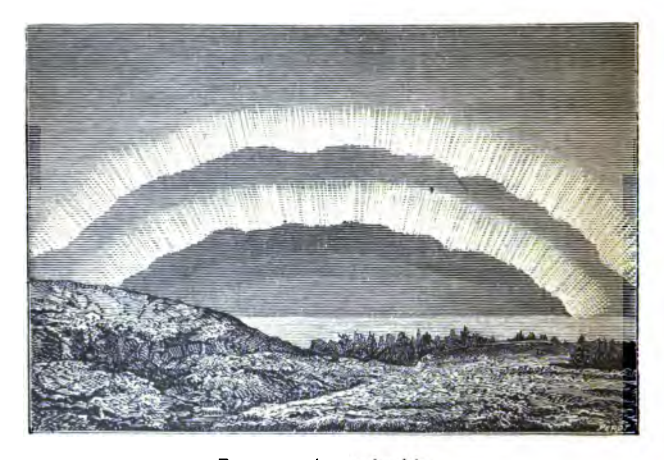


Fig. 33. — Aurore boréale.

mineux à franges de rayons brillants, réguliers ou sinueux, et animés d'un rapide mouvement ondulatoire.

Londres, 1880), Alfred Angot (*Les Aurores polaires;* voir *la Lumière électrique* du 21 octobre au 23 décembre 1882), Liais (*Les Mondes*, t. XXXVIII), etc.

Ce mouvement d'ondulation, en particulier, offre une complète analogie avec celui qu'on a comparé, dans les aurores, aux plis et aux replis d'un serpent ou à ceux d'une draperie agitée par le vent.

§ 90. *Couleur de la lumière.* — Bien que la lumière jaune domine dans ces expériences, par suite de l'emploi de l'eau salée, on observe aussi, sur les points où l'eau provenant de la vapeur condensée est moins chargée de sel, des teintes pourpres et violacées analogues à celles des aurores.

§ 91. *Rayons.* — Les rayons de l'arc lumineux des aurores polaires doivent provenir, de même que ceux qu'on observe dans ces expériences, de la pénétration du flux électrique dans les amas humides ou glacés qu'il rencontre. Le vide qui en résulte se comblant à mesure, de nouveaux rayons se reforment sans cesse, et l'on s'explique ainsi comment les jets de lumière des aurores *dardent*

ou paraissent lancés et renouvelés à chaque instant.

§ 92. *Segment obscur.* — Le cercle ou segment obscur formé dans les aurores par la brume ou le voile nébuleux que rencontre le flux électrique correspond, dans l'expérience, au cercle ou segment humide qui environne l'électrode, et autour duquel s'épanouit le courant voltaïque.

Les portions les plus voisines du point d'où s'écoule le flux électrique étant vaporisées, ce n'est qu'à une certaine distance que l'onde électrique arrêtée se transforme en chaleur et en lumière.

§ 93. *Cercles lumineux.* — L'analogie de forme entre l'arc lumineux produit dans nos expériences et celui des aurores est aussi très frappante. Cette forme de l'écoulement du flux électrique dans le voltamètre vient de ce que le liquide n'entoure pas tout à fait l'électrode. Mais si cette électrode est immergée davantage, il se produit des ondes ou des cercles lumineux entiers, de même que dans les

aurores dont l'arc n'est souvent considéré que comme la portion visible pour l'observateur d'un cercle lumineux complet.

§ 94. *Fluctuation de lumière.* — On a vu que, dans les mêmes expériences, le liquide est violemment agité par le flux électrique; des tourbillons se forment par le choc des ondes électrisées les unes contre les autres, et, si l'on opère avec peu de liquide, il se produit finalement une ébullition lumineuse correspondant à cette fluctuation de lumière qui caractérise aussi les aurores polaires.

§ 95. *Formation de vapeurs.* — La vapeur d'eau se dégage avec d'autant plus de vivacité et d'abondance que l'électrode pénètre plus dans le liquide. Ce phénomène, que les plus fortes batteries de l'électricité statique permettent à peine de soup-
nner, est important à considérer; car il explique
urellement les chutes abondantes de pluie ou de

neige qui ont presque toujours été constatées pendant les aurores polaires[1].

§ 96. *Vents.* — La production de grands vents à la suite de l'apparition des aurores boréales montre, ainsi que nous l'avons fait remarquer au sujet de la grêle, que la décharge d'une grande quantité d'électricité dans l'atmosphère entraîne, par son action calorifique, par la vaporisation instantanée et la condensation rapide qui en résultent, la formation de puissants courants aériens.

§ 97. *Bruissement.* — Le bruissement qui a été souvent entendu pendant les aurores est dû, comme celui qui accompagne nos expériences, à la vaporisation produite par les sillons de feu électrique pénétrant dans une masse humide.

[1] « Plusieurs fois les aurores boréales ont été accompagnées de gelée blanche, et le plus grand nombre d'entre elles ont été suivies par de grandes chutes de neige ou de pluie ou par des coups de violents et des tempêtes. » (Extrait d'une communication de Ne de Saussure à Arago ; *Notices scientifiques*, t. I, p. 694.)

« Ce bruit est surtout, dit-on, fort intense quand las rayons sont dardés avec vivacité[1]. » La production du bruissement dans le voltamètre est aussi d'autant plus intense que les rayons qui bordent l'arc lumineux sont plus longs et se forment avec plus de vivacité au sein du liquide.

§ 98. *Perturbations magnétiques.* — Les perturbations magnétiques causées par les aurores se reproduisent dans ces expériences, en plaçant une aiguille aimantée près du circuit. La déviation aug-

[1] Kaëmtz, *Traité de météorologie*, traduction de Ch. Martins, p. 428.
L'existence de ce bruit a été révoquée en doute par quelques observateurs ; mais les nombreux témoignages émanant de personnes habitant la région même des aurores boréales prouvent que ce bruit se fait quelquefois entendre, sans doute quand la hauteur à laquelle se produit l'aurore n'est pas trop grande. (Voir Arago, *Notices scientifiques*, t. I, p 693.)
Voici ce qu'en dit le docteur Hjaltalin, dans un mémoire sur les *Aurores boréales* :
« J'ai d'abord porté mon attention pour découvrir si quelque bruit accompagnait ou non les aurores boréales ; je crois pouvoir assurer que ce bruit existe, bien qu'on ne l'entende que relativement peu s[illegible]ent ; je l'ai entendu seulement six fois sur cent observations. » ([illegible] *l'Année scientifique*, 1864, par Louis Figuier, p. 107.)

mente ou diminue, selon que l'arc lumineux se développe plus ou moins dans le liquide.

§ 99. *Flux positif.* — Il résulte encore de ces faits que les aurores doivent être produites par un flux d'électricité *positive;* car les phénomènes lumineux sont les mêmes que ceux de l'électrode positive dans le voltamètre, et l'électrode négative n'offre rien de semblable.

§ 100. *Décharge vers les hautes régions de l'atmosphère.* — Mais les aurores polaires sont-elles une décharge entre l'électricité positive de l'atmosphère et celle de la terre supposée négative? Si cela était, on devrait observer des chutes de foudre très fréquentes aux pôles, ou des effets très brillants de lumière sur les points saillants du sol, formant la contre-partie du phénomène qui se passe dans l'air. Or, l'observation montre qu'il n'en est pas ainsi. Nous inclinons donc à penser que c'est le vide imparfait des hau régions qui, fonctionnant comme une imme

enveloppe conductrice, joue le rôle de l'électrode négative dans les expériences rappelées ci-dessus, et que l'*électricité positive s'écoule vers les espaces*

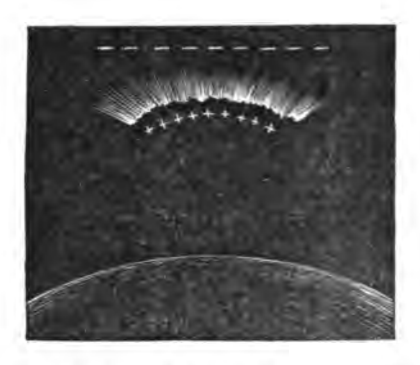


Fig. 34. — Arc lumineux, avec rayons, formé par la décharge de l'électricité positive vers les hautes régions de l'atmosphère.

planétaires et non vers le sol, à travers les brumes ou les nuages glacés qui flottent au-dessus des pôles[1] (fig. 34).

[1] Une expérience relative aux aurores boréales était présentée à l'Exposition de géographie de Paris, en 1875, par un savant professeur de l'Université d'Helsingfors, M. Sélim Lemström, pour prouver que les aurores devaient résulter d'une décharge électrique entre les

§ 101. *Origine de l'électricité des aurores polaires et de l'électricité atmosphérique en général.* — Quelle est la source de cette électricité polaire? On a admis qu'elle venait de l'équateur et des

couches supérieures de l'atmosphère, chargées d'électricité positive, et la terre supposée négative. Des tubes de Geissler, disposés en forme d'arc, sur un cadre isolant, et placés à une certaine distance d'une grosse sphère métallique, garnie de pointes, en relation avec une machine électrique, s'illuminaient dès qu'on tournait la machine.

Cette expérience montrait bien la possibilité de l'illumination à distance de couches d'air raréfiées, sous l'influence d'une source électrisée ; mais en même temps que les tubes de Geissler devenaient lumineux, les pointes de la sphère électrisée étaient également lumineuses, phénomène que l'on n'observe pas dans les aurores polaires. Les montagnes ou parties saillantes des pôles devraient être aussi lumineuses que les régions de l'atmosphère où brillent les aurores, s'il y avait réellement décharge d'électricité entre les hautes régions et la terre, de même que dans toute décharge électrique, le pôle positif et le pôle négatif sont sensiblement aussi lumineux l'un que l'autre, et l'intervalle est entièrement rempli par un trait de feu ou une lueur continue.

Depuis lors, M. Lemström a institué de nouvelles et intéressantes expériences (voir *Comptes rendus,* 1883, et ouvrage *l'Aurore boréale;* Gauthier-Villars, 1886), montrant l'influence électrique exercée par les aurores à la surface de la terre, en disposant des conducteurs métalliques couvrant une grande étendue du sol. Des aigrettes lumineuses se sont produites sur ces conducteurs pendant l'apparition des aurores.

Ces faits, joints à l'étude spectroscopique importante que M. Lem-

régions tropicales. Mais on peut objecter, il nous semble, que les nuages électrisés doivent se décharger dans un aussi long parcours; car on sait que les orages sont de plus en plus rares, à mesure que l'on s'approche des pôles. Des analogies déduites de nos expériences et que nous avons déve-

ström a faite des lueurs, démontrent bien la nature électrique des aurores polaires, mais ne prouvent pas qu'elles soient une décharge d'électricité entre les régions où elles apparaissent et la surface de la terre.

Une nuée fortement électrisée pendant un orage produit les mêmes effets lumineux sur le sol; des aigrettes, des feux Saint-Elme apparaissent. (Voir § 22, fig. 9, et § 33.) Des phénomènes lumineux se manifestent également au sein de la nuée, tels que des éclairs ou des lueurs même analogues à celles des aurores (voir note du § 104), si la quantité d'électricité en jeu est très abondante, mais c'est entre les nuages ou les diverses parties d'un même nuage que se produit la plus grande partie des décharges, et la décharge avec le sol est un fait accidentel qui n'a lieu que quand la nuée vient à s'en rapprocher à une faible distance; dans ce cas il y a chute de foudre, ce qui ne se produit pas aux pôles pendant les aurores boréales.

De plus, quand on considère que les aurores polaires apparaissent à des hauteurs considérables dans l'atmosphère, que l'on a évaluées quelquefois à plus de 150 kilomètres (voir Arago, *Notices scientifiques*, t. I, p. 626; — Kaëmtz, *Météorologie*, p. 428), il est difficile d'admettre qu'elles constituent une décharge électrique entre l'atmosphère et la terre.

D'un autre côté, on a observé des aurores très basses évaluées à

loppées ailleurs[1], nous ayant conduit à considérer les corps célestes comme chargés d'électricité positive, nous serions porté plutôt à regarder la terre elle-même comme chargée d'électricité positive se dégageant du sol et des mers par voie de simple *émission*, et rayonnant de toute sa surface, aux pôles comme à l'équateur, en produisant des effets très différents dans l'atmosphère, par suite des condi-

une hauteur de 4 kilomètres seulement au-dessus du sol. La hauteur est en effet très variable, et ne paraît dépendre que de celle à laquelle se trouvent les nuages de glace ou brouillards reconnus nécessaires à leur apparition. Ces aurores, dont on ne peut se rendre compte par la considération des couches raréfiées de l'atmosphère qui n'existent qu'à une très grande hauteur, s'expliquent au contraire, d'une manière satisfaisante, par nos expériences dans lesquelles, sans opérer avec de l'air raréfié, mais en faisant déboucher le flux électrique sur des surfaces humides, on observe des phénomènes électriques analogues à ceux des aurores. L'électricité dans ces conditions, produit elle-même, par la vaporisation, le vide nécessaire à la production de manifestations lumineuses; les formes en couronne, en arc, en sillons de feu animés d'un mouvement ondulatoire se manifestent sous l'action même du flux électrique dans ces expériences. De même, dans la nature, le flux électrique produit, dans les masses nuageuses, le vide d'où résultent la manifestation lumineuse et les formes particulières aux aurores polaires.

[1] *Recherches sur l'électricité*, § 253 à § 259. Paris, 1879 et 1883.

tions météorologiques tout à fait opposées de ces régions.

§ 102. L'électricité positive émanant ainsi du globe terrestre ne serait pas, selon nous, le résultat d'une production ou génération proprement dite, par des causes physiques ou chimiques. Elle ne serait point due à l'évaporation, ni au frottement, ni à des actions thermo-électriques, mais proviendrait d'*une charge primitive ou provision d'électricité propre à la terre elle-même*, emportée par elle, à l'origine de sa formation, et qui tendrait à se dissiper, de même que la chaleur qu'elle possède, avec une lenteur extrême, en raison de sa masse considérable.

§ 103. Cette électricité, pénétrant l'atmosphère, gagnerait sans cesse les couches supérieures dont l'air, de plus en plus raréfié, offre d'immenses espaces conducteurs, et se répandrait de là dans les régions planétaires. Les couches inférieures de l'air, voisines de la terre, n'étant point raréfiées, on conçoit que l'électricité positive n'y apparaisse qu'en faible quantité et s'accumule dans les couches

plus élevées. Ainsi s'expliquerait l'accroissement de la quantité d'électricité positive, à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère.

§ 104. La terre ne se comporterait donc pas, suivant nous, vis-à-vis de l'atmosphère, comme un corps qui produirait de l'électricité par le frottement d'un autre corps prenant l'électricité contraire. Car on serait entraîné alors à admettre que cette production a lieu à la surface de séparation de la terre et de l'atmosphère, sans aucune action physique ou mécanique apparente autre que l'évaporation lente à la surface des mers. Or, il est reconnu aujourd'hui que le phénomène de l'évaporation n'est pas par lui-même une source d'électricité.

Les vapeurs formées au-dessus des mers nous paraissent constituer seulement *un prolongement conducteur, dans l'atmosphère, de la masse liquide conductrice du globe*, de laquelle émane, par suite de sa tension, l'électricité positive. On s'explique ainsi que le dégagement d'électricité soit plus grand au-dessus des mers qu'au-dessus de la croûte solide

du globe. La vapeur d'eau facilite la diffusion de l'électricité dans l'air qui, à la pression ordinaire, se comporte comme un corps isolant[1].

§ 105. On comprend également, d'après cette hypothèse de la terre considérée comme un corps électrisé dans toute sa masse, que cette électricité propre puisse se dégager, par voie d'éruption, pour former les nuées volcaniques, toujours accompagnées d'éclairs et de tonnerre, et se manifester aussi lors des *tremblements de terre* qui doivent se

[1] Dans un très intéressant ouvrage sur la météorologie de l'île de Madère, l'éminent directeur de l'Observatoire royal d'Édimbourg, M. Piazzi-Smyth a fait remarquer que notre théorie pourrait expliquer la formation de *nuages lumineux* extraordinaires, à anneaux concentriques, qu'il a observés au-dessus de l'île, d'où il se dégage constamment d'immenses quantités de vapeurs d'eau. (C. Piazzi-Smyth, *Madeira Meteorologic*, p. 40 à 44. Édimbourg, 1882.)

Le major Sabine avait fait une observation analogue pendant son voyage pour la détermination des lignes d'intensité magnétique en Écosse. « Il séjourna dans l'île de Sky, qui est entourée de montagnes nues et élevées, parmi lesquelles on en remarque une qu'enveloppe presque toujours un *nuage lumineux*, la nuit, d'une manière permanente. Plusieurs fois M. Sabine en vit sortir des *jets semblables à ceux des aurores boréales.* » (Lettre du docteur Robinson, directeur de l'Observatoire d'Armagh, à Arago. — *Notices scientifiques*, I, p. 73.)

rattacher aux mouvements internes d'une masse liquide fondue, chargée d'électricité[1].

Les vapeurs produites au-dessus de cette masse fondue, et trouvant une issue par les volcans, doivent nécessairement entraîner de l'électricité, de même que les vapeurs formées au-dessus des mers, sans qu'il soit nécessaire pour cela d'admettre

[1] Ces considérations ont été exposées dans un mémoire que nous avons présenté à l'Académie des sciences, le 13 mars 1876, et dont des extraits ont été publiés en 1879, dans nos *Recherches sur l'électricité*, § 243 à § 252.

Les tremblements de terre qui ont eu lieu sur les côtes de la Méditerranée, en France et en Italie, au mois de février 1887, ont été, en effet, accompagnés de phénomènes électriques et de perturbations magnétiques. En songeant aux effets d'aspiration que nous avons cités plus haut (§ 73), on conçoit que des nuées d'une immense étendue, fortement chargées d'électricité, puissent exercer sur la masse fondue qui se trouve au-dessous de la mince écorce du globe, des effets d'attraction assez intenses pour donner un faible mouvement à cette masse liquéfiée, et, par suite, déterminer des dislocations de la croûte terrestre.

L'électricité de l'atmosphère est une force sans doute très capricieuse et, pour ainsi dire, de passage ; ses manifestations ne nous apparaissent que lorsqu'elle est localement *accumulée ;* mais elle n'en est pas moins une force d'une extrême puissance dont on peut se faire aujourd'hui une idée, en voyant les effets mécaniques et calorifiques que l'on obtient avec l'électricité artificielle, si minime cependant vis-à-vis de celle de la nature.

des effets chimiques souterrains produisant de l'électricité par des moyens qui nous seraient inconnus.

§ 106. Si l'on considère maintenant cette émission d'électricité dans les régions équatoriales et tropicales où l'évaporation est très abondante, il en résulte naturellement des nuages fortement électrisés et des orages continuels.

Ces nuages ne peuvent s'élever directement à une grande hauteur, car ils sont emportés par les vents réguliers de ces régions, et les phénomènes électriques, tout en apparaissant au-dessus même des points où les orages ont pris naissance, continuent de se reproduire sur leur parcours, mais en s'affaiblissant à mesure que la latitude augmente.

§ 107. Aux pôles, au contraire, où l'évaporation est beaucoup plus faible, la quantité d'électricité tendant à émaner du globe terrestre est, sans doute, moins abondante, car l'air moins humide à la surface du sol ou des mers de ces régions s'en charge avec moins de facilité; mais celle qui se dégage, s'élève directement dans les couches supé-

rieures de l'atmosphère et forme ainsi une sorte de nappe électrisée tendant à se diffuser dans l'espace.

Si aucun amas humide conducteur ne vient s'interposer entre cet écoulement de l'électricité, à partir des régions déjà hautes de l'atmosphère vers des régions encore plus élevées, le flux électrique se décharge d'une manière obscure ou faiblement lumineuse; car la transition de couches d'air moins raréfiées aux couches plus raréfiées n'est pas brusque, mais graduelle. Son passage ne se révèle alors que par des perturbations magnétiques.

Si, au contraire, les amas nuageux à l'état de globules liquides ou de cristaux de glace flottent dans l'intervalle, des effets lumineux se manifestent comme dans nos expériences, et on observe des aurores polaires[1].

[1] ... « Les derniers observateurs placent le siège de ces apparitions, non pas à la limite de notre atmosphère, mais *dans la région même où se forment les nuages et les amas de vapeur vésiculaire...* » (Voir *Cosmos*, par A. de Humboldt; traduction de MM. Faye et Galuski, 4e édition, t. I, p. 221.)

§ 108. Cette manière d'envisager la terre comme chargée d'électricité positive, ainsi que l'atmosphère elle-même, semble rendre inexplicables, au premier abord, les décharges qui se produisent, dans les orages ordinaires, entre les nuages électrisés *positivement* et le sol également *positif*.

Mais cette difffculté apparente se résout facilement, si l'on considère qu'une portion donnée de la surface du sol, tout en émettant de l'électricité positive, en est beaucoup moins chargée que les amas nuageux qui passent au-dessus, après avoir récolté et emmagasiné, sur leur parcours, l'électricité positive répandue dans l'air, et apportant aussi une grande partie de celle qu'ils ont prise, lors de sa formation même, au-dessus des mers, dans les régions chaudes.

Il en résulte que cette portion du sol, n'ayant qu'une tendance positive relativement faible, devient, *par influence*, fortement *négative*. Les choses se passent comme entre les nuages eux-mêmes, qui peuvent être tous électrisés positivement et sont néanmoins le siège de violentes déchar-

ges, parce qu'ils sont électrisés à des degrés différents[1].

§ 109. Les considérations que nous venons de développer s'accordent, du reste, jusqu'à un certain point, avec l'hypothèse d'Ampère, admettant l'existence d'un courant électrique de direction déterminée, enveloppant le globe et produisant son action magnétique.

On pourrait ajouter seulement, pour expliquer l'émission de l'électricité dans l'atmosphère et, par suite, dans l'espace, que ce doit être un courant d'une tension très grande, non point maintenu dans une certaine épaisseur de la croûte terrestre, comme dans un conducteur matériel limité, à l'instar du fil d'un solénoïde, mais rayonnant autour de toute la masse du globe, en raison de sa haute tension.

§ 110. *Conclusion.* — En résumé, nous conclurons de cette étude que *les aurores polaires résul-*

[1] MM Quetelet et Palmieri ont admis, comme on le sait, que les nuages qui semblent négatifs ne le sont que par influence, à l'une de leurs extrémités seulement.

tent, selon nous, *de la diffusion dans les couches supérieures de l'atmosphère, autour des pôles magnétiques, de l'électricité positive émanant des régions polaires elles-mêmes, soit en rayons obscurs quand il n'y a pas de nuages interposés, soit convertie en chaleur et en lumière par la rencontre d'amas aqueux, à l'état liquide ou solide, qu'elle vaporise avec bruit et précipite, sous forme de pluie ou de neige, à la surface du globe*[1].

[1] *Comptes rendus*, t. LXXXII, p. 629, 13 mars 1876.

CHAPITRE V

EXPLICATION DE DIVERS PHÉNOMÈNES PRODUITS PENDANT LES ORAGES

I

Intermittences dans les décharges des nuages orageux.

§ 111. Les courants électriques de haute tension, que nous avons employés pour rendre compte des phénomènes précédents, peuvent illuminer des tubes à air raréfié d'une résistance de plusieurs milliers d'ohms. La lueur émise est même plus brillante que celle qui est produite par des courants d'induction.

Quelquefois, lorsque la résistance est trop grande

pour qu'ils soient illuminés immédiatement, un



Fig. 35. — Batteries secondaires à lamelles de plomb, chargées par trois couples à sulfate de cuivre, illuminant, par leur décharge, un tube à air raréfié.

supplément de tension, ajouté à l'un des pôles, en

approchant ou en éloignant un corps chargé d'électricité statique, tel que le plateau d'un électrophore, ou un bâton d'ébonite frotté, détermine l'illumination continue du tube à air raréfié.

La figure 35 représente cette expérience.

§ 112. Mais si on interpose, comme nous l'avons fait, dans le circuit des batteries B et du tube à air raréfié T, deux peignes formés de papier à filtrer P. humecté d'eau distillée (fig. 36), le tube s'illumine avec des *intermittences* spontanées; les lueurs y apparaissent par éclairs, séparés par des intervalles d'une ou plusieurs secondes, et se reproduisent, pendant plusieurs heures, jusqu'à ce que la batterie soit entièrement déchargée.

§ 113. Nous pensons que les choses se passent d'une manière analogue dans la nature, et on peut s'expliquer ainsi comment les nuages, sans se recharger ou sans engendrer de nouvelles quantités d'électricité, peuvent, avec une charge donnée, produire des effets intermittents longtemps prolongés.

Les peignes de papier, humectés d'eau distillée,

jouent, dans notre expérience, le rôle des portions irrégulières de nuages qui se trouvent à des distances plus ou moins grandes les unes des autres, et constituent un appareil à contact imparfait ne permettant pas la décharge, en une seule fois, de toute l'électricité que renferme la batterie.

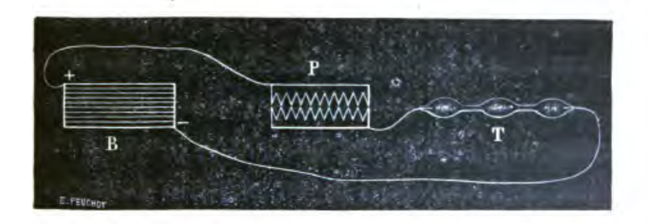


Fig. 36. — Production de lueurs intermittentes dans un tube d'air raréfié, à l'aide d'un courant électrique de haute tension.

Comme la petite quantité d'eau qui se trouve à l'extrémité des pointes est rapidement vaporisée par l'effet calorifique de la décharge, le courant s'interrompt dès que la conductibilité du milieu est insuffisante.

Mais, par suite de la multiplicité des pointes,

d'autres parties humides se présentent au contact, et la décharge se reproduit ainsi, tantôt par un point, tantôt par un autre, d'une manière intermittente.

De même une nuée orageuse, plus ou moins divisée, peut être considérée comme ayant une charge déterminée et limitée d'électricité qu'elle a recueillie, sur son parcours, en traversant les régions élevées de l'atmosphère, toujours électrisées.

Cette charge peut être, par suite, assimilée à celle qui est contenue dans la batterie secondaire. Mais, en raison de la nature vaporeuse et mobile qui forme la nuée, la décharge ne peut être complète, en une seule fois, quand il y a rencontre avec un autre nuage, ou quand des portions de la même nuée viennent à se séparer l'une de l'autre et présentent, au bout de quelque temps, des différences dans leur état de tension électrique[1]. Alors les

[1] D'après Beccaria (voir Arago, *Notice sur le tonnerre*, p. 8), les nuages orageux résultent de la réunion de petits nuages distincts, déchirés et morcelés.

Suivant Franklin, un gros nuage unique ne saurait être orageux.

éclairs se produisent, avec une plus ou moins grande intensité, suivant la distance plus ou moins grande des lambeaux nuageux, ou suivant la plus ou moins grande conductibilité du milieu interposé, comme cela a lieu avec les peignes de papier humide, dans notre expérience[1].

§ 114. Si, par suite de l'humidité plus grande de

Deux conditions sont nécessaires pour qu'un nuage soit orageux : il faut qu'il soit très étendu, et, de plus, que de petits nuages s'interposent entre sa surface inférieure et la terre.

Saussure dit dans son *Voyage au col du Géant* : « Quant aux orages, je n'en ai vu naître, dans ces montagnes, qu'au moment de la rencontre ou du conflit de deux ou plusieurs nuages. »

Sans doute, dans les régions relativement basses de l'atmosphère, où apparaissent le plus souvent les orages, il n'y a pas un milieu à air raréfié tout constitué, comme dans les tubes de Geissler employés ici.

Mais l'électricité, par sa puissance calorifique, vaporisant immédiatement les extrémités humides de deux portions de nuage électrisées, produit le vide nécessaire pour que la décharge apparaisse à l'état lumineux.

Nous avons du reste montré le rôle que devait jouer cette vaporisation de la matière humide des nuages pour la manifestation des lueurs des aurores boréales, et expliqué comment les aurores pouvaient apparaître, ainsi qu'on l'a souvent observé, dans les régions basses de l'atmosphère, où l'air n'est pas naturellement raréfié, comme dans les hautes régions. (Voir note de la page 152.)

quelques-unes des pointes des peignes de papier, celles-ci viennent à se trouver en contact plus prolongé, et si la vaporisation dure plus longtemps, la lueur dans le tube à air raréfié, au lieu de n'apparaître que pendant une seconde ou une fraction de seconde, persiste pendant plusieurs secondes ou minutes, et on s'explique ainsi l'émission continue de lumière sans tonnerre et sans décharges bruyantes, que l'on a observée quelquefois dans certains nuages ou dans des portions de nuages orageux[1].

[1] M. Antoine d'Abbadie a vu, en Éthiopie, tout l'horizon couvert d'éclairs, sans que le tonnerre se fît entendre.

Un fait dont il y a lieu de s'étonner qu'on n'ait pas mieux apprécié l'importance, dit Arago, dans sa *Notice sur le tonnerre*, c'est l'émission non pas *intermittente*, mais *continue* de lumière à la surface des nuages.

Rosier, Nicholson, Beccaria, en ont relaté divers exemples. Le major Sabine a observé des effets lumineux du même genre, ainsi que nous l'avons mentionné au sujet des aurores boréales. (Voir note de la page 155.) Suivant lui, ces phénomènes de lumière avaient leur cause, quelle qu'en puisse être d'ailleurs la nature, dans le nuage même.

Ces effets sont dus, évidemment, comme dans nos expériences, à une décharge intermittente ou continue de l'électricité accumulée et emmagasinée dans le nuage.

§ 115. On a aussi, dans cette expérience, une représentation assez exacte des *éclairs de chaleur* dont la production, dans certains cas, a été déjà imitée et expliquée, d'une manière très satisfaisante, par M. Le Roux[1], avec des ballons à air raréfié, placés dans le voisinage d'une machine électrique dont on tirait des décharges qui déterminaient la production de lueurs, dans ces ballons, par un effet d'induction électrostatique.

Dans l'expérience que nous venons de décrire, les effets d'*intermittence* analogues à ceux des éclairs de chaleur et des éclairs ordinaires se reproduisent spontanément et directement, sans être provoqués par influence, ce qui correspond au cas le plus général et peut-être le plus fréquent dans la nature.

[1] *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXVIII, p. 1104 et 1265. — 1869.

II

Formes des éclairs.

§ 116. Les étincelles des machines électriques et des bobines d'induction imitent comme on le sait, d'une manière assez parfaite, la forme sinueuse des éclairs ordinaires dits en zigzag.

Toutefois, l'appareil que nous avons fait connaître sous le nom de *machine rhéostatique*[1] (fig. 37), et qui se compose d'un grand nombre de condensateurs, à lame mince en mica, alternativement

[1] Voir *Recherches sur l'électricité*, § 260, et *Comptes rendus*, t. LXXXV, p. 794, 29 octobre 1877.

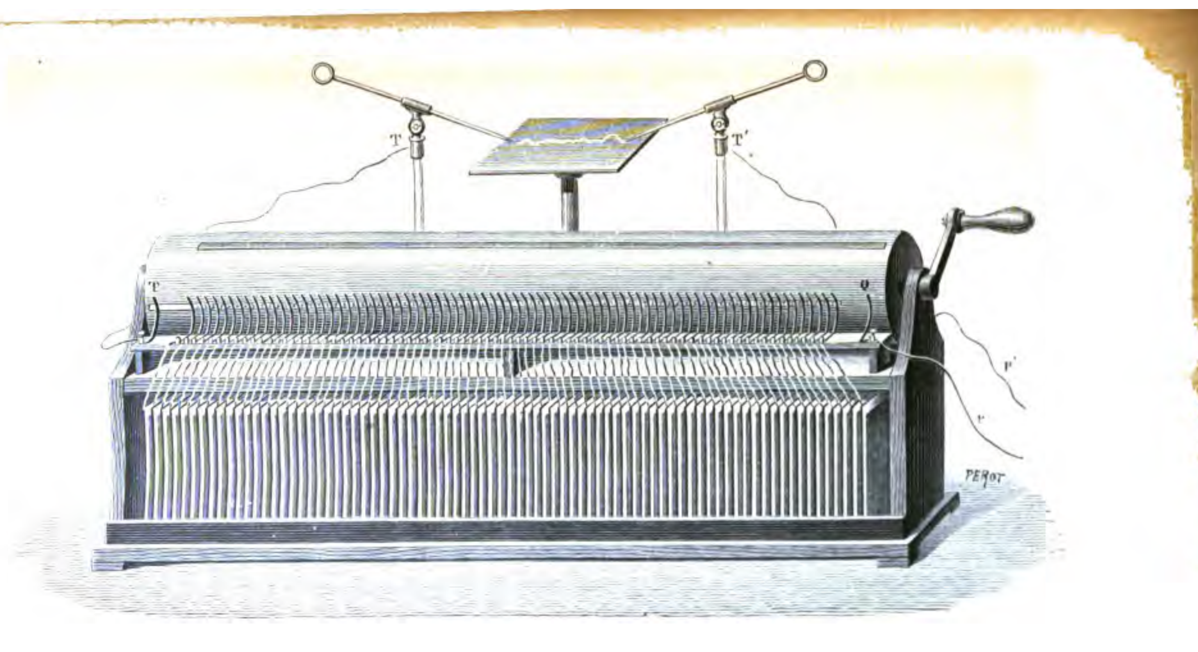


Fig. 37. — Machine rhéostatique.

chargés en surface et déchargés en cascade par une source d'électricité voltaïque de haute tension (une batterie secondaire de 800 couples) permet d'obtenir, entre deux pointes, des étincelles dont l'analogie de forme avec celle des éclairs est particulièrement remarquable.

La figure 38 représente quelques-unes de ces étincelles, gravées d'après la trace qu'elles ont laissée en les faisant éclater sur de la fleur de soufre, répandue à la surface d'un plateau de résine. Cette trace reste visible après que l'étincelle a éclaté; elle peut être gravée sur la résine même à l'aide d'un burin ou d'un poinçon, et calquée ensuite fidèlement. C'est ainsi qu'ont été obtenues en 1879 les étincelles représentées figure 38.

§ 117. Depuis cette époque, les progrès de la photographie ont permis d'obtenir des reproductions instantanées d'éclairs. La figure 39 représente des photographies d'éclairs qui se sont manifestés pendant un orage à Reichenberg, en Bohême, le 6 juillet 1883[1].

[1] *La Nature*, 29 décembre 1883.



Fig. 38. — Sillons d'étincelles produites par les étincelles de la machine rhéostatique (1879).

Or, il suffit de comparer ces figures pour en



Fig. 39. — Sillons d'éclairs photographiés à Reichenberg, en Bohême (1883).

reconnaître l'identité presque complète avec quelques-unes des étincelles de la machine rhéostatique

obtenues et gravées plusieurs années auparavant[1]. On y trouve exactement le même genre de ramifications en forme d'anastomoses.

[1] Voir *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXXIX. p. 78, 14 juillet 1879.

III

rborisations produites par la foudre.

118. *Arborisations produites par les étincelles de la machine rhéostatique.* — Les étincelles obtenues à l'aide de la machine rhéostatique offrent des *arborisations* qui apparaissent en enlevant l'excès de soufre par quelques légers chocs donnés à la lame isolante sur laquelle elles ont laissé leur sillon.

La figure 40 représente, aux deux tiers de la grandeur naturelle, une arborisation formée sur le trajet d'une étincelle de $0^m,15$ de longueur.

Ces effets permettent de s'expliquer les em-

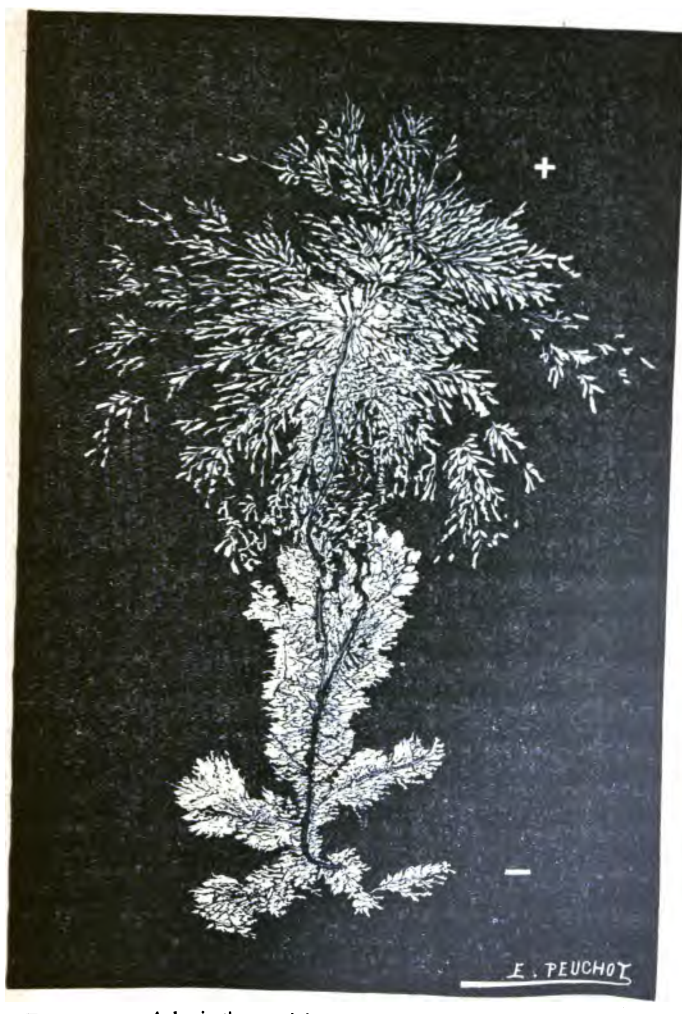


FIG. 40. — Arborisation produite sur la fleur de soufre, par une étincelle de la machine rhéostatique (2/3 de la grandeur naturelle).

preintes d'apparence végétale que l'on a observées quelquefois sur le corps de personnes foudroyées, et qui ne sont que le résultat des ramifications du trait de la foudre elle-même.

On en trouve un exemple cité dans le journal *the Lancet*, de Londres : « Un berger du comté de Leicester gardait son troupeau dans les champs, lorsqu'un orage éclata, et naturellement, comme bien des gens s'obstinent à le faire, il chercha un refuge sous un arbre. Peu de temps après il sentit une commotion au-dessus de l'épaule gauche, et, perdant tout à coup l'usage de ses jambes, tomba. Lorsqu'on le transporta à son domicile, il avait encore toute sa connaissance; mais il se plaignait de douleurs dans le dos et dans les jambes. L'examen auquel se livra le médecin appelé pour lui donner des soins lui fit découvrir un assez bizarre effet de coup de foudre. De l'épaule gauche, jusqu'en bas, occupant tout le dos, apparaissait, admirablement reproduite en saillie sur la peau et dans une teinte écarlate brillante, une tige d'arbuste avec de nombreuses branches délicatement tracées comme avec

une pointe d'aiguille. Le tronc avait à peu près trois quarts de pouce de largeur, et l'aspect général était celui d'un pied de fougère à six ou huit branches. Le tout était fort bien reproduit et comme imprimé sur le dos du patient[1]. »

On peut se rendre compte facilement du cas dont il s'agit par son analogie avec ce qui se passe dans l'expérience précédente. Au moment où l'étincelle se produit, on voit la fleur de soufre projetée en l'air, surtout autour des deux pôles. De même, dans le cas de la chute de la foudre, la poussière du sol ou toute autre matière, placée sur le passage de la décharge, doit être projetée, et l'on conçoit que cette matière, portée à une très haute température, puisse produire, sur le corps humain, un effet de cautérisation instantanée sous une forme arborescente.

[1] *Les Mondes*, 12 septembre 1878.

IV

Division mécanique des corps frappés par la foudre.

§ 119. *Perforations cratériformes produites par des courants électriques de haute tension.* — Si on met une feuille de papier à filtrer, humectée d'eau salée, en communication avec le pôle d'une batterie secondaire de 400 éléments, et si, d'autre part, on vient à toucher la surface humide avec le pôle positif, il se produit, au-dessous de ce fil, avec dégagement de lumière et projection de vapeur, une cavité en forme de *cratère* hérissé, sur ses bords, d'innombrables filaments desséchés et enchevêtrés les uns dans les autres (fig. 41). Le fil positif

se trouve en même temps recouvert d'un magma formé par la pâte de papier transportée; des débris filiformes adhèrent aussi à l'électrode sur une longueur de 10 à 15 centimètres.

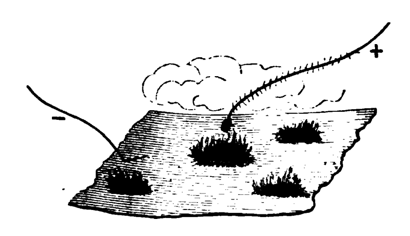


Fig. 41. — Perforations cratériformes produites par un courant électrique de haute tension.

Les extrémités des filaments sont dirigées vers l'électrode positive.

Ces phénomènes résultent de l'action calorifique exercée par le courant, laquelle vaporise et dessèche instantanément les fibres humides de la matière organique, et sont dus en même temps à sa grande tension, qui produit des effets d'attraction

ou d'aspiration et la division mécanique de la matière soumise à la décharge.

§ 120. Cette expérience offre une image frappante des effets de dessiccation produits par la foudre sur les végétaux, de leur division en lattes, en lanières ou en brins innombrables; elle explique leur arrachement, leur soulèvement et les effets d'aspiration qui accompagnent souvent les décharges de l'électricité atmosphérique.

§ 121. On a vu plus haut (§ 44, fig. 15) la description d'une expérience dans laquelle l'étincelle elle-même présente comme une corbeille de pointes lumineuses, quand la décharge d'un courant de haute tension frappe une surface humide, et indique ainsi la forme que l'électricité négative semble choisir pour aller en quelque sorte à la rencontre de l'électricité positive pour la neutraliser.

Ces expériences militent donc encore en faveur de la disposition en corbeille de pointes adoptée par Melsens pour les paratonnerres de l'Hôtel de

ville de Bruxelles et appuient particulièrement les vues du savant belge à ce sujet[1].

Les formes données récemment par M. Buchin aux pointes des paratonnerres des magasins à poudre paraissent aussi très favorables pour défendre ce genre d'édifice contre les décharges foudroyantes de l'électricité atmosphérique[2].

1 *Des paratonnerres à pointes, à conducteurs et à raccordements terrestres multiples*, par Melsens. Bruxelles, Hayez, 1877.

2 *De la construction des paratonnerres*, par A. Tricoche (*Cosmos*, 4 juin 1887, p. 269).

V

Altération de la cohésion moléculaire des tiges et des conducteurs des paratonnerres, à la suite des orages.

§ 122. *Modification dans la forme et la cohésion de fils métalliques traversés par des courants de haute tension.* — Les courants électriques de haute tension peuvent, en traversant des conducteurs métalliques, déterminer, à leur intérieur, un ébranlement moléculaire remarquable, et modifier même leur texture moléculaire, de manière à les rendre très fragiles et très cassants.

C'est ce qui résulte d'expériences que nous avons faites avec le courant de quantité de la machine rhéostatique.

En disposant en effet l'appareil décrit ci-dessus (fig. 37, p. 171), de telle sorte que tous les condensateurs soient associés en quantité, pendant la décharge, nous avons constitué l'appareil repré-

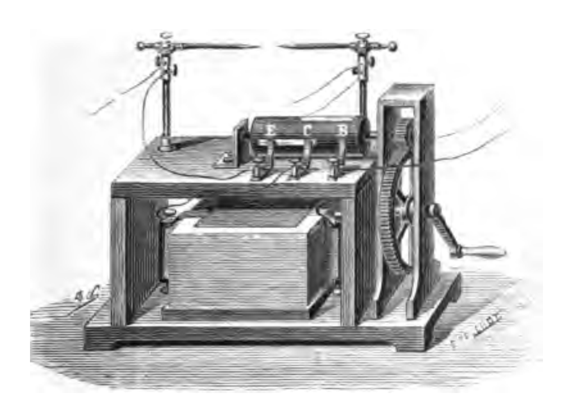


Fig. 42. — Machine rhéostatique disposée pour la production d'effets de quantité.

senté figure 42, qui, mis en action par la batterie secondaire de 800 couples, donne un courant doué de propriétés toutes particulières, et dont les effets mécaniques l'emportent de beaucoup sur les effets calorifiques.

Ainsi, tandis qu'un fil de platine très fin, traversé directement par le courant de haute tension de la batterie, rougirait simplement, sans manifester aucun changement de forme appréciable, lorsque ce fil est traversé par le courant de décharge en quantité de la machine rhéostatique, il change immédiatement de forme. On voit apparaître, sur toute la longueur du fil ($0^m,40$ environ), et à des distances semi-régulières, des plis à *angles vifs* formant comme une série d'accolades. Le fil à demi tendu se relève et passe de la forme *a b* à la forme *a' b'* (fig. 43).

Ces angles semblent presque régulièrement opposés de distance en distance; cependant on en voit souvent deux ou trois consécutifs dont le sommet est dirigé dans le même sens.

Si l'on continue de faire tourner la machine, après avoir toutefois rapproché les pinces entre lesquelles le fil est fixé, afin qu'il ne se tende pas au point de se rompre, de nouveaux plis apparaissent autour des angles déjà formé, et le fil prend la forme *a'' b''*. Si on le raccourcit de manière à le ré-

duire à o^{m},10 de longueur, il rougit au blanc en

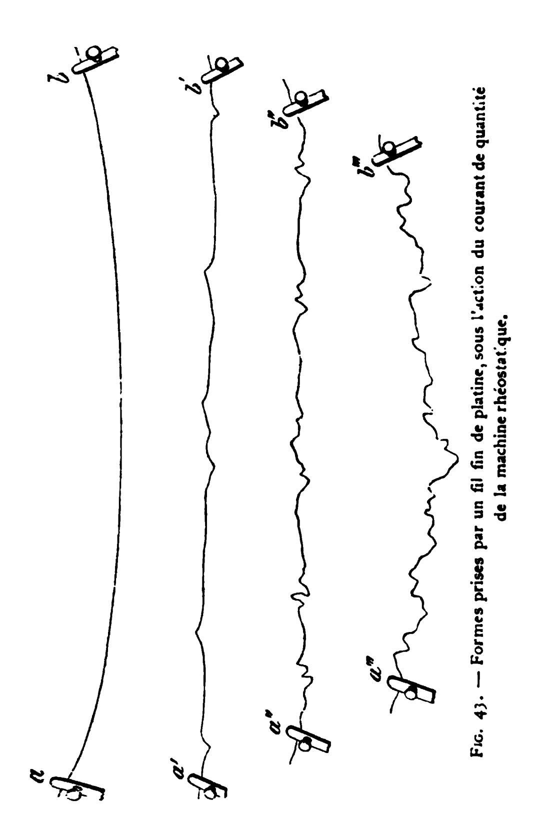


Fig. 43. — Formes prises par un fil fin de platine, sous l'action du courant de quantité de la machine rhéostatique.

offrant des angles très nombreux ou des sinuosités

tellement accentuées ($a''' b'''$), qu'il présente l'aspect d'une étincelle électrique continue.

Dans ce dernier cas, il se trouve raccourci, après l'expérience, au point d'avoir perdu 5 à 6 millimètres, sur une longueur de 10 centimètres [1].

§ 123. Pendant que ce phénomène se passe, on entend, près du fil, un bruit ou un craquement analogue à celui d'une étincelle qui se produirait dans le fil lui-même, bien que ce fil ne présente aucune solution de continuité.

Ce bruit produit dans le fil, sans l'intervention d'aucune action électro-magnétique, est dû à l'ébranlement moléculaire résultant du passage du courant particulier de la machine qui a pour effet de déterminer de très brusques contractions et distensions de la matière des corps qu'il traverse.

[1] Ces phénomènes peuvent être rapprochés de ceux qui ont été observés par Nairne et par MM. Edmond Becquerel, Le Roux, Melsens, avec des décharges de batteries de Leyde, et de ceux qu'on remarque quand on fait rougir un fil long et fin à l'aide d'une pile d'un grand nombre d'éléments. Mais ils sont ici plus marqués et présentent d'autres caractères, en raison de la nature différente de la source électrique employée, tenant à la fois de l'état dynamique et de l'état statique par la quantité et la tension de l'électricité en jeu.

§ 124. Le fil devient très cassant à la suite du passage de ce courant. Si l'expérience dure plus de deux minutes, il finit toujours par se rompre spontanément.

Cette tendance d'un fil à devenir cassant sous l'influence d'un courant électrique avait été déjà remarquée par Peltier et par d'autres observateurs. Mais elle était si faible avec les courants ordinaires de l'électricité dynamique qu'elle n'était pas tout à à fait admise. Ici elle est évidente.

§ 125. *Conséquence relative aux paratonnerres.* — Si les décharges de cet appareil, traversant un fil métallique fin, peuvent y produire un changement de structure moléculaire, tel qu'il se rompt spontanément au bout de quelques instants, le passage des courants de la foudre, qui réunissent à un bien plus haut degré la quantité et la tension électriques, doit produire sur de plus gros conducteurs, tels que les tiges ou les cordes en fer des paratonnerres, des effets tout à fait semblables.

Ces conducteurs peuvent donc devenir très cas-

sants et offrir des modifications de structure invisibles, non seulement à la suite des chutes directes de foudre qu'ils ont pu subir, mais encore quand ils ont servi longtemps à l'écoulement silencieux de grandes quantités d'électricité atmosphérique. Ils peuvent même avoir reçu un certain nombre de décharges, sans qu'il se soit formé d'interruption appréciable à l'aide d'instruments électriques, et se trouver néanmoins dans un état tel de fragilité moléculaire qu'une nouvelle et puissante décharge détermine la rupture du conducteur, de même que dans les expériences décrites ci-dessus.

Ainsi s'expliquent les accidents arrivés quelquefois avec des paratonnerres en apparence irréprochables.

VI

Coups de foudre extraordinaires accompagnés de jet d'eau.

§ 126. *Coup de foudre de Ribnitz.*— L'expérience de la *pompe votaïque* et celle du *bélier hydro-électrique* (fig. 21 et 22, p. 109 et 111) permettent de se rendre compte d'un coup de foudre très singulier qui s'est manifesté pendant un violent orage, accompagné de pluie et de grêle, le 30 juillet 1884, à Ribnitz, dans le Mecklembourg-Schwerin, et qui, sans précédent connu jusqu'ici, a paru absolument inexplicable [1].

[1] *Sur un coup de foudre extraordinaire*, par le professeur Leonhard Weber (*Zeitschrift für Elektrotechnik*, par J. Kareis, 15 mai 1885,

La foudre étant tombée sur une habitation, l'une des vitres de la fenêtre d'une pièce située au premier étage fut percée d'un trou étoilé, et, au moment de l'apparition de l'éclair, on constata l'irruption brusque d'une grande masse d'eau qui parut provenir de la surface du sol, s'éleva sous forme de jet vers le plafond et inonda toute la pièce (fig. 44). Ce fait, observé par plusieurs témoins, peut être considéré comme absolument hors de doute.

Il nous paraît s'expliquer par un effet mécanique de l'électricité tout à fait analogue à celui qui se passe dans notre expérience.

§ 127. *Coup de foudre du château de la Sistière, près de Blois.* — Le fait précédent était le seul de ce genre connu jusqu'ici. Mais nous avons recueilli tout récemment un autre exemple non moins remarquable qui s'est produit pendant un orage, dans le département de Loir-et-Cher, en 1884.

3e année, p. 282, et *la Lumière électrique*, 30 janvier 1886, 8e année, t. XIX, p. 215, note de M. Paul Samuel).

Mme Aucher, habitant près de Blois, au château

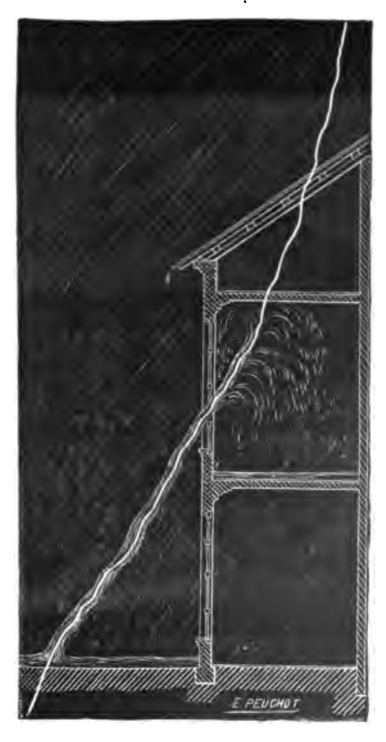


Fig. 44. — Jet d'eau produit sur le trajet d'un éclair, pendant un orage, à Ribnitz (Mecklembourg-Schwerin).

de la Sistière, muni de cinq paratonnerres qui su-

bissent de fréquentes visites de la foudre, nous a relaté qu'elle se trouvait, un jour, sur le perron de

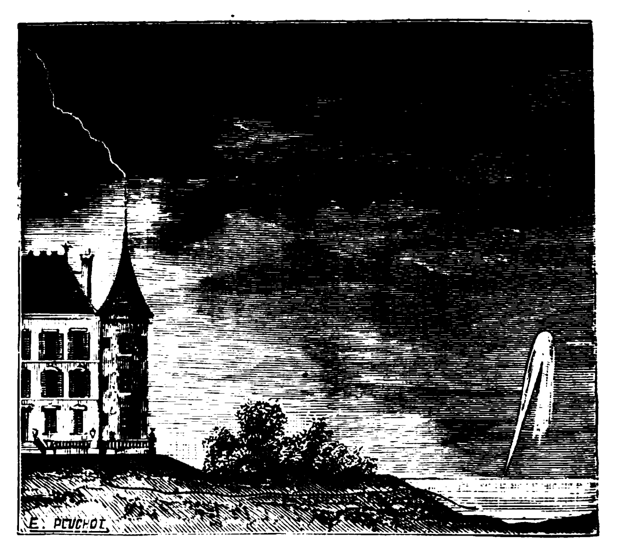


Fig. 45. — Coup de foudre, accompagné d'un jet d'eau, observé au château de la Sistière, près de Blois.

son château; au moment où un orage éclatait, un éclair accompagné d'un violent coup de tonnerre se produisit; la foudre parut tomber sur le para-

tonnerre de l'une des tourelles, et en même temps, Mme Aucher vit jaillir à la surface d'un étang du parc, situé à une certaine distance, mais en communication avec les chaînes des paratonnerres, un jet d'eau très fin qui s'éleva à une assez grande hauteur (fig. 45).

Les effets du même genre produits par la décharge de quantité de la machine rhéostatique (fig. 22, p. 111) rendent ce fait en quelque sorte tout à fait naturel, et permettent de le classer au nombre des effets mécaniques que peut occasionner l'électricité de l'atmosphère, lorsqu'elle se décharge sous certaines conditions.

Dans le cas dont il s'agit, la chaîne du paratonnerre, en relation avec l'étang duquel s'est élancé le jet d'eau, a joué exactement le rôle de l'électrode métallique qui débouche au sein de l'eau dans nos expériences.

APPENDICE

I

RELATIONS DE DIVERS CAS DE FOUDRE GLOBULAIRE

Depuis que l'attention a été appelée par Arago sur les *éclairs en boule* ou *globes fulminants*, dont il a fait une classe à part[1], de nouveaux exemples de ces phénomènes remarquables ont été décrits, et d'anciennes observations ont été rappelées par divers auteurs.

Nous en avons déjà cité un certain nombre dans le premier chapitre de cet ouvrage; nous en ajou-

[1] *Notice sur le tonnerre*, publiée en 1838, dans l'*Annuaire du Bureau des longitudes*, et reproduite dans ses *Œuvres complètes*, t. I, 1854.

tons ici quelques autres qui peuvent s'expliquer également par les considérations que nous avons exposées § 1 à § 43.

Exemples de globes fulminants accompagnés d'un bruissement ou d'un sifflement, lors de leur apparition [1].

Le 3 juillet 1725, un orage ayant fondu sur le territoire d'Aynho, dans le Northamptonshire, le tonnerre tua un berger et cinq moutons. Au plus fort de la bourrasque, le Révérend Joseph Wasse vit un *globe de feu* gros comme la lune, et entendit le *sifflement* qu'il produisait dans l'atmosphère en passant au-dessus de son jardin [2].

Le 1er mai 1746, la foudre atteignit l'église d'Osterwahla en Westmanie. Aussitôt après le coup, la femme du sonneur et sa servante entrèrent dans l'église. Elles y avaient fait à peine cinq ou six pas

[1] Voir § 16, p. 36.

[2] Arago, *Notice sur le tonnerre*.

qu'elles furent épouvantées par un second coup de tonnerre et virent une grosse masse de feu sortir du plancher de l'église et se diriger sur la porte par laquelle elles venaient d'entrer; toutes deux entendirent un ***bruit semblable à celui d'un torrent.*** Au même instant le vicaire, qui était dans la cour du presbytère, vit un *globe de feu* sortir de la tour de l'église que le premier coup de foudre avait frappée et s'évanouir dans l'air[1].

Le 16 janvier 1770, vers 9 heures du soir, à Chemnitz, en Hongrie, au milieu d'un ouragan et d'éclairs très vifs, la foudre tomba sous la forme d'un *globe* de la grosseur d'un tonneau, et pendant que cette énorme masse de feu sillonnait les airs, on entendit un *sifflement aigu* qui fut suivi d'une explosion semblable à celle du tonnerre le plus violent. La tour de la principale église fut endommagée par la chute du météore[2].

[1] Sestier, *La Foudre*.
[2] Sestier, d'après Richard.

M. Hogard, ancien officier d'artillerie, raconte que le 26 août 1821, à Épinal, étant près d'une fenêtre pendant un orage, il vit un *globe de feu* de 4 pouces de diamètre environ, qui s'élevait vers les nuages sous un angle de 50 à 60°, et avec un *sifflement* analogue à celui des fusées d'artifice. Au même instant, il éprouva une commotion électrique si forte qu'il s'en ressentit pendant plusieurs jours. L'explosion qui suivit de près cette apparition fut semblable à celle d'un mortier[1].

Exemples de globes fulminants de couleur rouge[2].

Le 18 avril 1777, vers 6 heures du soir, au milieu d'un *violent orage*, on vit subitement étinceler les ferrures qui supportent la grande cloche placée dans la tour de la cathédrale de Sienne, immédiatement au-dessous du pied du paratonnerre, et sortir de la petite fenêtre au-dessous de l'horloge,

1 *Annales de chimie et de physique*, t. XIX, p. 56, 1822.

2 Nous avons indiqué, § 14, page 35, la cause probable de cette couleur des globes fulminants.

un *globe de feu de couleur pourpre*, qui, après avoir parcouru le conducteur fixé le long du mur, s'ensevelit en terre. Mais avant d'entrer dans la rainure pratiquée dans le mur et qui logeait le conducteur, ce globe de feu lança plusieurs grosses étincelles qui tombaient sur ce pavé et qui furent comparées aux étincelles qui tomberaient d'un tison bien allumé, et qu'on frapperait contre un mur. Était-ce des portions du globe de feu ou des parties de fer en fusion[1] ? Il se répandit dans la petite rue une fumée qui avait une forte odeur de soufre. (Sestier, d'après le professeur Pistoi, t. I. p. 130.)

Pendant un orage du mois de juin 1829, trois personnes étaient assises dans la cuisine d'une auberge, près de Montmouth, lorsque tout à coup

[1] Sans aucun doute, ces étincelles étaient ici des particules de fer en fusion, provenant de l'action calorifique exercée par le courant fulminant à la surface du conducteur en fer. Dans notre expérience d'un globule de feu parcourant la surface d'un condensateur, lorsque la décharge de la batterie a toute sa puissance, et qu'il y a beaucoup d'électricité en jeu, le globule projette aussi, dans sa marche, des étincelles formées de particules d'étain fondu.

elles entendirent deux violents coups de tonnerre, et virent immédiatement après un ***globe de feu*** de la grosseur d'un ***cricket-ball***, d'un ***rouge cramoisi*** et plus brillant que le feu ordinaire, entrer par une porte de derrière qui était ouverte, traverser la cuisine, enfiler un couloir et sortir par la porte de la façade[1].

Dans le terrible ouragan de la Barbade, en 1831, on vit à Saint-Vincent des météores de feu tomber du ciel; un surtout, sous la forme d'un ***globe ardent et d'un rouge vif***, descendit perpendiculairement d'une immense hauteur[2].

Exemples de globes fulminants de forme *ovoïde*[3].

Le 1er juin 1886, à Grand-Spauren (Limbourg, Belgique), une grange, couverte de tuiles, a été incendiée par la foudre. Un témoin a observé qu'au

[1] Sestier, d'après Howard.

[2] W. Reid, *Théorie des orages.*

[3] Nous avons obtenu également, dans nos expériences, des ***boules de feu ovoïdes***, animées d'un mouvement gyratoire. (Voir § 4, p. 18.)

moment où la foudre frappait la grange, elle affectait la forme d'une *boule ovale*[1].

A *Villers-le-Peuplier*, le 2 septembre 1886, une femme a vu sur le faîte d'une maison incendiée une *boule de feu ovale*, d'une grosseur de 15 centimètres environ, *tourner quelques instants sur elle-même*[2].

Exemples de globes fulminants animés d'un mouvement gyratoire[3].

Outre l'exemple que nous venons de citer, on pourrait en signaler un très grand nombre de cas; nous mentionnerons encore le suivant :

Le 28 août 1839, au milieu d'un *violent orage*, dont les nues noires et surbaissées touchaient presque au sommet des bâtiments, la foudre tomba au milieu de la cour du bureau central de l'octroi de la ville de Paris, encore inachevé. Cette foudre avait

[1] *Notes sur les observations des coups de foudre en Belgique*, par F. Evrard, ingénieur en chef des Télégraphes (*Bulletin de la Société belge d'électriciens*, t. IV, sept.-oct. 1887, tableau n° 2).

[2] F. Evrard, *Bulletin de la Société belge d'électriciens*, t. IV, p. 300.

[3] Voir § 18, p. 37.

la forme d'un gros *globe de feu*, et elle était accompagnée d'une traînée de vapeur : elle frappa le sol formé de remblais nouveaux, elle y creusa un enfoncement de 18 centimètres de diamètre ; elle s'y agitait violemment *en tournant sur elle-même*, enleva les terres meubles, puis elle rejaillit pour retomber à 3 mètres plus loin, où elle fit une nouvelle excavation de 9 centimètres de diamètre s'agitant toujours violemment. Ce globe de feu sauta bientôt de cette excavation sur le mur de clôture, dont il suivit le chaperon dans une longueur d'environ 30 mètres. Arrivé à l'angle du mur, en face de l'hôpital Saint-Louis, ce globe, déjà très diminué de volume, s'élança dans la rue sur le pavé mouillé par la pluie ; il s'y traîna en long sillon serpentant, traversa la porte cochère de l'hôpital, et disparut au milieu de la cour, en face de l'église.

A mesure que le temps s'écoulait, on voyait sa masse s'amoindrir ; lorsqu'elle arriva au milieu de la cour de l'hôpital Saint-Louis, ce n'était plus qu'une lanière mince, peu lumineuse, qui disparut tout à coup.

Au moment de la chute de ce globe de feu dans la cour de l'octroi, tous les ouvriers et les employés qui s'étaient mis à l'abri sous les hangars ressentirent une vive commotion électrique, et tous furent impressionnés par la forte odeur sulfureuse qu'il laissa après lui[1].

Exemples de la marche lente et capricieuse des globes fulminants[2].

Un jour du mois de juillet 1744, vers midi, un nuage menaçant arriva au-dessus de Knifwingsgute ; le tonnerre se rapprochait peu à peu. Une paysanne était occupée à faire cuire quelques mets sur le foyer de la cuisine, lorsque le tonnerre éclate, et elle voit une *boule de feu* de la grosseur du poing descendre par la cheminée, *passer entre ses pieds sans la blesser,* et continuer sa route sans incendier, sans même renverser le rouet et divers autres objets qui se trouvaient sur le plancher. Effrayée,

[1] Amédée Guillemin, *Le Monde physique*, t. III, p. 492, 1883. Hachette et Cie.

[2] Voir § 20, p. 38.

elle se précipite vers la porte; mais au moment où elle l'ouvre, la *boule de feu* vient en sautillant, pénètre dans une pièce qui s'ouvrait au dehors, la traverse, franchit la porte, arrive dans la cour, entre dans une grange, remonte le mur du fond et, arrivée au-dessous du bord du toit de chaume, elle éclate et se disperse avec un bruit terrible; le feu prend à la grange et la réduit promptement en cendres[1]. (Sestier, d'après Nicol. Palmstiern.)

A Hautefeuille (canton de Charny, Yonne), la foudre tomba sur un gros chêne dont l'écorce fut séparée du bois. Sous la forme d'un *globe de feu* de 50 centimètres environ de diamètre, le météore roula sur le sol, se dirigea vers la cour d'une ferme située à plus de 300 mètres, menaçant de pénétrer dans une grange, et comme après *un moment d'hésitation*, se précipita dans un abreuvoir où il

1 Ce cas est tout à fait identique à celui qui a été communiqué par Babinet à l'Académie des sciences le 5 juillet 1852 et que nous avons rappelé page 43. Le globe de feu passa près des pieds d'un ouvrier tailleur, témoin du phénomène, sans le blesser.

disparut. Il avait l'air de *tourner avec une grande rapidité sur lui-même* et semblait lancer tout autour de lui la terre *du sillon qu'il creusait dans le sol en brûlant l'herbe sur tout son parcours*. Aucun vestige de fumée ne fut laissé derrière lui. La durée de cet imposant spectacle, autant que l'émotion des témoins leur permit de l'apprécier, depuis le moment de la chute de la foudre sur le chêne jusqu'à la disparition du globe de feu dans l'abreuvoir, leur parut être de plus d'une minute[1]. (Séguier.)

Exemples de globes fulminants formés dans les nuages[2].

Le R. P. de Lozeran du Fesc, professeur de mathématiques à l'Université de Perpignan, dans une

[1] Ces *moments d'hésitation, ce sillon creusé*, la durée du phénomène, etc., se retrouvent également dans la marche du *globule de feu ambulant* que nous avons décrit § 8, pages 21 et suivantes. Dans notre expérience, le globule de feu, après avoir cheminé quelques instants dans une direction, reparaît tout à coup sur un autre point, comme s'il avait fait un bond. Ses caprices sont identiques à ceux des globes fulminants naturels.

[2] Voir § 9, p. 26, et § 23, p. 48.

lettre adressée en 1727 à M. Sarrau, secrétaire de l'Académie des belles-lettres, sciences et arts de Bordeaux, faisant suite à une dissertation sur la cause et la nature du tonnerre et des éclairs, couronnée par l'Académie, cite le cas suivant de foudre globulaire[1] :

« C'était le 2 ou le 3 du mois de septembre 1716, vers les 3 heures de l'après-midi ; deux voyageurs descendaient du haut du Cantal pour aller aux Eaux de Vic. Le temps était serein et très chaud. Ils aperçurent en bas, vers le milieu de la montagne, un brouillard qui couvrait tout le vallon. Au-dessus du brouillard s'élevaient une quantité de feux ; d'autres serpentaient dans la nuée. On entendait en même temps un grand bruit, quoique moindre que le bruit ordinaire du tonnerre. La variété et les divers mouvements de ces feux qui ressemblaient tantôt à des gerbes de fusées, tantôt à des serpenteaux qui coupaient la nuée en mille sens différents,

1 Paris, 1727.

offraient aux yeux un objet très agréable. La nuée elle-même donnait un assez beau spectacle par les ondées qui paraissaient sur sa surface.

« Quand les deux voyageurs furent entrés dans la nuée, ils sentirent l'air devenir froid. Le brouillard était si épais que l'un d'eux ne voyait pas son cheval qu'il menait par la bride. Le même voyageur vit quantité de *corps globuleux qui voltigeaient dans la nuée,* les uns allant d'un côté, les autres de l'autre. Leur couleur était d'un rouge obscur. Il la compara au *feu bleuâtre* de la flamme du soufre allumé. *Ils tournoyaient avec beaucoup de rapidité autour de leur centre*. Leur volume n'était pas égal ; il y en avait de grands et de petits. Il en vit un petit croître considérablement en fort peu de temps. *Lorsque ces boules passaient, il tombait des gouttes de pluie aux environs, mais qui étaient beaucoup plus grosses au-dessous de ces boules, ce qu'il remarqua lorsqu'il en passa quelqu'une au-dessus de sa tête*[1].

1 Cette observation est très importante. Elle concorde avec nos expériences (voir § 44, p. 77), dans lesquelles nous avons obtenu la

« Il observait les jeux de ces boules, lorsqu'il en vit une s'ouvrir à sept ou huit pas de lui, et laisser couler en s'ouvrant une flamme très belle. Ce globe pouvait avoir environ 2 pieds de diamètre. En s'ouvrant il fit un bruit pareil à celui d'une livre de poudre à canon qu'on jetterait dans le feu et l'instant d'après ce fut un bruit de tonnerre épouvantable[1].

« Les deux voyageurs se sentirent poussés et secoués et commencèrent à humer un air infecté. Quand ils furent hors de la nuée, ils virent tomber des gouttes fort grosses, mais qui n'avaient point de force. Ils entendaient toujours gronder le tonnerre, et avec beaucoup plus de bruit que lorsqu'ils étaient au-dessus de la nuée. Les éclairs de même leur parurent alors avoir beaucoup plus d'éclat et de vivacité. Le tonnerre, qui tomba en

projection de grosses gouttes liquides, sous l'action de décharges électriques, et, par suite, appuie notre théorie de la formation des grosses pluies d'orage, ou de la grêle si les nuages sont très élevés, et à une basse température. (§ 48, p. 83, et § 63, p. 96.)

[1] Voir § 25, p. 50.

deux ou trois endroits aux environs, brûla quelques arbres et mit le feu à quelques chaumières. L'inondation fut terrible. »

Dans la relation d'un orage qui, en décembre 1852, fit beaucoup de dégâts près de Ludgvan (Cornouailles), M. Borlase dit qu'on aperçut à plusieurs reprises des *boules de feu* parfaitement distinctes se précipiter des nuages vers la terre[1].

Un soir, à l'île de France, en 1870, les nuages, comme on pouvait en juger par les montagnes du port, descendirent jusqu'à la faible hauteur de 400 mètres. La pluie fut très abondante. Il éclairait beaucoup, mais les éclairs, dit l'académicien Le Gentil, loin de ressembler aux éclairs ordinaires, n'étaient autre chose que de *très gros globes de feu* qui paraissaient subitement et disparaissaient de même sans explosion[2].

Le 20 juin 1772, pendant qu'un orage grondait

[1] Arago, *Notice sur le tonnerre.*
[2] Arago, *Notice sur le tonnerre.*

sur la paroisse de Steeple-Aston (Wiltshire), on vit dans les airs *un globe de feu osciller* pendant assez longtemps au-dessus du village, et se précipiter ensuite verticalement sur les maisons, où il produisit beaucoup de dégâts [1].

Le 1er mars 1774, près de Wakefield, *à la suite d'un violent orage,* lorsqu'il ne restait plus dans tout le ciel que deux nuages peu élevés au-dessus de l'horizon, Nicholson vit des météores semblables à des étoiles filantes, *descendre du nuage* supérieur au nuage inférieur.

En septembre 1780, M. James Adair, d'East-Bourn (Sussex), vit *plusieurs globes de feu* tomber d'un gros nuage noir dans la mer.

« Le 22 septembre 1803, à 7 heures du soir, à Belfort, N.-C.-Louis Ordinaire vit, par un ciel très obscur, un globe de feu qui sortit d'un nuage au zénith et se précipita dans un autre. Il était

[1] Arago, *Notice sur le tonnerre.*

d'une couleur rouge jaunâtre extrêmement brillante[1]. »

Exemples de globes de feu produits par influence ou de flammes produites dans les mêmes conditions[2].

Après avoir cité un grand nombre d'exemples d'aigrettes et de feux Saint-Elme, Arago ajoute :

Par des circonstances atmosphériques toutes pareilles, du moins en apparence, et pendant des orages d'une égale intensité, les feux dont nous venons de nous occuper peuvent avoir des formes dissemblables ; souvent ils ressemblent à des aigrettes ; parfois aussi leur lumière se trouve concentrée en un *petit globe*, sans aucune trace de jets divergents.

Au lieu de simples aigrettes, on a vu quelque-

[1] Magaz. *Encycl.*, t. III, p. 537 (1803). — Sestier et Méhu, *De la foudre*, p. 124. Paris.

[2] Voir § 22, p. 45 ; § 33, p. 65.

fois des lueurs assez étendues et assez brillantes pour qu'on ait pu les comparer à des flammes.

Maffei, au château de Fordinovo, en 1713, vit, pendant un orage, apparaître sur les dalles d'une salle du rez-de-chaussée une *flamme* vive très agitée qui disparut subitement comme elle était venue ; au même instant, il entendit un bruit assez fort, et des plâtras se détachèrent de la voûte.

L'abbé Jérôme Lioni de Ceneda observa, près de Venise, pendant un orage des plus furieux, une *flamme* très vive qui s'éleva rapidement de terre à une hauteur de deux coudées, et disparut subitement avec une violente explosion [1].

Lors d'un violent orage qui éclata un soir sur Paris, en 1874, M. Montreuil, directeur de l'imprimerie de M. Gauthier-Villars, se trouvant sur la place Saint-Michel, nous a relaté qu'il avait vu, sur plusieurs points de la place, des flammes électriques jaillir du sol inondé par une pluie abon-

[1] P.-A. Daguin, *Traité de physique*, 4e édition, t. III, p. 253 et suiv. Paris, 1879.

dante, et présentant un aspect analogue à un bol de punch enflammé.

Exemples de globes fulminants disparaissant sans explosion.

En 1841, à Milan, on vit, pendant un violent orage, un globe de feu ayant la grandeur et l'éclat de la lune, parcourir une rue avec assez de lenteur pour que des curieux aient pu le suivre en marchant. Ce globe, s'élevant peu à peu, vint heurter la croix d'une église, et là disparut subitement en produisant un bruit sourd.

Le 1er juin 1886, à *Moha* (Belgique) le chef de station a vu, au moment de la décharge, une *boule de feu* monter le long du poteau d'arrêt, muni d'un paratonnerre, situé en face de la gare, suivre le fil des sonneries vers le bâtiment et disparaître au moment où elle atteignait la sonnerie de station vers Huccorgne, sonnerie qui n'a pas été endommagée [1].

[1] F. Évrard, *Coups de foudre en Belgique.*

A Huccorgne, en Belgique, le même jour, un garde-route, qui se trouvait à 50 mètres environ du bâtiment de la station, a vu devant le bureau, au moment de la décharge, une gerbe de feu, puis immédiatement après, à terre, une *boule de feu*, de 15 à 20 centimètres de diamètre, qui s'est élevée à une hauteur approximative de 50 mètres et a disparu.

M. Antoine Abbadie avait observé de même, en Éthiopie, vers 1847, un *globe de feu* qui descendit jusqu'à 12 mètres de distance d'une mare, puis remonta et fut perdu de vue à 50 mètres de hauteur.

« Le 24 avril 1887, à Mortrée (Orne), éclata entre 3 et 7 heures du soir, un orage d'ouest-sud-ouest d'une extrême violence.

« La foudre pénétra dans une maison par la cheminée et sortit dans la rue en perçant un mur en brique de trois trous, au ras du sol.

« Derrière cette habitation, une personne était

dans une étable, et se disposait à traire une vache. Une boule de feu entre par la porte, passe entre les jambes de l'animal et disparaît sans laisser de traces et sans causer de dégâts.

« Pendant cet orage, les coups de tonnerre n'étaient pas précédés des roulements habituels ; ils éclataient brusquement comme des décharges de mousqueterie et se succédaient à de courts intervalles[1]. »

Lors d'un orage qui éclata, à Tours, le 1er février 1884, on observa, dit M. de Tastes[2], de ces *éclairs globulaires* qu'on voit circuler quelquefois sous forme de *masses sphéroïdes lumineuses*, qui se meuvent avec assez de lenteur pour qu'on puisse en suivre la capricieuse trajectoire, qui apparaissent subitement dans les habitations, disparaissent parfois sans bruit, et parfois aussi éclatent comme des obus. Ceux qui furent observés à Tours appar-

1 *Annales télégraphiques*, t. XIV, p. 346.

2 Savant météorologiste, professeur au lycée de Tours, aujourd'hui décédé.

tiennent à la catégorie des globes tranquilles et inoffensifs. On en vit un certain nombre, mais M. de Tastes n'a tenu à citer que trois faits bien constatés et dont les témoins ne pouvaient être soupçonnés d'hallucination, ni d'avoir été sous l'influence de la plus légère émotion.

Un honorable négociant de Tours qui se trouvait sur le pas de sa porte, vit, au moment d'un grand coup de tonnerre, un *globe d'un rouge sombre* sillonner le boulevard Heurteloup et disparaître sans bruit. Le chef de cuisine et ses aides virent un *globe* de la grosseur d'un œuf de poule et d'un *rouge sombre*, descendre par la cheminée, rebondir sur les dalles, se diriger vers la cour et disparaître sans bruit. Deux tonneliers de la place Saint-Étienne travaillant tranquillement dans leur atelier virent, au moment d'un grand coup de tonnerre, un *globe d'un rouge sombre*, de la grosseur de la tête d'un enfant, apparaître subitement à 1 décimètre du sol de l'atelier, s'élever obliquement vers la porte et disparaître avec un *léger bruissement*, avant qu'ils aient eu le temps d'échanger un seul mot. L'un

d'eux, homme d'un âge avancé, me disait qu'il n'avait jamais rien vu de pareil dans sa longue existence et qu'il était bien aise d'avoir vu cela avant de mourir.

Voilà des faits authentiques, ajoute M. de Tastes, constatés par des témoins de bonne foi, sans aucune idée préconçue, n'ayant jamais entendu parler d'éclairs en boule, et racontant naïvement ce qu'ils ont vu en termes nets, précis et parfaitement intelligibles [1].

Exemples de globes fulminants suivis d'explosion

La foudre tomba à Stralsund, en Poméranie, le 29 juin 1670, sur le clocher de l'église de Saint-Nicolas, pendant l'office du dimanche et présenta des effets extraordinaires. Elle passa par le trou rond de la voûte et tomba sur l'autel, sous forme d'une *balle de feu*, remplissant l'église de lumière,

[1] *Annuaire de la Société météorologique*, avril 1884, 32e année.

de feu, de vapeurs, et accompagnée de violentes détonations[1].

A *Gembloux* (Belgique), le 2 juin 1886, le personnel du bureau télégraphique a vu une *boule de feu* suivre les fils depuis le plafond jusqu'au commutateur, puis éclater en produisant une forte détonation[2].

A *Ypres*, le 10 juin 1886, une *boule de feu* de la grosseur d'une bille de billard est sortie du tableau indicateur d'un poste télégraphique, dont un numéro a été endommagé, et a éclaté à environ 10 centimètres au-dessus de la table des appareils, produisant une détonation qui a été entendue dans les différents locaux de la station et dans un café situé à 150 mètres du bureau. Le commis, témoin du phénomène, a reçu un éclat de la boule de feu sur la main et quatre ou cinq dans la

1 *Philosophical Transactions*, 1670.
2 F. Évrard, *Coups de foudre en Belgique.*

manche droite de sa veste de travail, laquelle a été légèrement roussie.

M. Bonis, chef des ateliers de la maison Bréguet, a vu à Gentilly, en 1841, pendant un orage, un globe de feu, ayant à peu près le diamètre apparent de la lune, se mouvoir assez lentement, comme un ballon, au-dessus d'un toit, de l'ouest à l'est ; le globe étant arrivé près d'un arbre, il se produisit un coup de tonnerre, et l'arbre fut foudroyé.

Exemples de globes fulminants ayant occasionné la mort ou des blessures.

Le 6 août 1753, Richmann, professeur à Pétersbourg, assisté de Solokow, était occupé à mesurer la force de l'électricité atmosphérique à l'aide d'un appareil qu'il avait dressé dans sa propre chambre et qui communiquait avec l'extérieur, lorsque Solokow vit un *globe de feu* bleu, gros comme le poing, s'élancer de l'appareil sur la tête du pro-

fesseur qui tomba frappé de mort. En cet instant, il s'éleva une espèce de brouillard ou de vapeur. La détonation fut celle d'un coup de pistolet. Au dehors, plusieurs personnes virent un globe de feu s'échapper des nues et venir frapper le sommet de l'appareil qui dépassait la maison [1].

Le même jour, où pendant un orage on observait au-dessus de Steeple-Aston le globe de feu oscillant cité plus haut (p. 211), les révérends MM. Wainhouse et Pitcairn, qui se trouvaient dans une pièce du presbytère, virent tout à coup apparaître à la hauteur de leur figure et à environ 1 pied de distance, un *globe de feu* de la grosseur du poing. Ce globe était entouré d'une fumée noire. En éclatant, il fit un bruit comparable à celui d'un grand nombre de pièces de canons qui partiraient à la fois. Une vapeur fortement sulfureuse se répandit aussitôt après dans toute la maison; M. Pitcairn fut dangereusement blessé. (Arago.)

[1] Priestley, *Histoire de l'électricité*.

Le 27 juillet 1769, plus de six cents personnes étaient réunies dans la salle de spectacle de Feltre, dans la Marche Trévisane, lorsque pendant un *épouvantable orage* avec torrents de pluie, on vit apparaître, par une grande ouverture qui se fit au comble du bâtiment un *globe de feu* de la grandeur d'un boulet de canon du plus gros calibre. A l'instant toutes les lumières s'éteignirent, plus de soixante-seize personnes furent tuées ou blessées[1]. (Sestier, d'après Richard.)

M. Buchwalder, ingénieur suisse, avait établi un signal géodésique sur le sommet du Sentis, dans le canton d'Appenzell, à 2504 mètres au-dessus du niveau de la mer.

« Le 5 juillet 1832, dit M. Buchwalder, la montagne était couverte de nuages, le vent était très

1 Cet exemple vient à l'appui de ce que nous avons dit, § 25, page 50. Il est clair que ce n'est pas le globe de feu de ce diamètre relativement faible qui a causé un tel désastre, mais c'est la décharge électrique de la nuée orageuse tout entière, ou d'une portion de la nuée qui s'est produite, là où le globe de feu a paru et révélé le point d'élection de l'écoulement du flux foudroyant.

violent ; à 6 heures, la pluie commenca et le *tonnerre retentit dans le lointain. La grêle tomba* en telle abondance qu'en peu d'instants elle couvrit le Sentis d'une couche glacée qui avait 4 centimètres d'épaisseur.

« A 8h 15 le tonnerre gronda de nouveau, et son bruit, de plus en plus rapproché, se fit entendre sans interruption jusqu'à 10 heures. Je sortis pour aller examiner le ciel et mesurer la profondeur de la neige à quelque pas de la tente.

« A peine avais-je pris cette mesure que la foudre éclata avec fureur et me força à me réfugier dans ma tente ainsi que mon aide. Alors un *nuage épais et noir* comme la nuit enveloppa le Sentis ; *la pluie et la grêle tombaient par torrents ;* le vent soufflait avec fureur ; les éclairs rapprochés et confondus *semblaient un incendie ;* la foudre mêlait ses coups précipités. Je sentis que nous étions dans le centre même de l'orage. Mon aide ne put se défendre d'un mouvement d'effroi, et il me demanda si nous ne courions pas quelque danger. Je le rassurai en lui racontant qu'à l'époque où MM. Biot et Arago

faisaient leurs observations géodésiques en Espagne, la foudre était tombée sur leur tente, mais n'avait que glissé sur leur toile sans les toucher eux-mêmes. J'étais tranquille, en effet; car habitué au bruit de la foudre, je l'étudie encore quand elle me menace de plus près.

« En ce moment, *un globe de feu* apparut aux pieds de mon compagnon, et je me sentis frappé à la jambe gauche d'une violente commotion qui était un choc électrique. Il avait poussé un cri plaintif : Ah ! mon Dieu ! Je me retournai vers lui, et je vis sur son visage l'effet du coup de foudre. Le côté gauche de sa figure était sillonné de taches brunes ou rouges. Ses cheveux, ses cils, ses sourcils, étaient crispés et brûlés ; ses lèvres, ses narines étaient d'un brun violet : sa poitrine semblait se soulever encore par instants ; mais bientôt le bruit de la respiration cessa. Je l'appelai, il ne me répondit pas. Son œil droit était ouvert et brillant : il me semblait qu'il s'en échappait un rayon d'intelligence ; mais l'œil gauche demeurait fermé, et en soulevant la paupière, je vis qu'il était terne. Je

supposais cependant qu'il restait de la vue du côté droit ; car, si j'essayais de fermer l'œil de ce côté, essai que je répétai trois fois, il se rouvrait et semblait animé. Je portai la main sur le cœur, il ne battait plus ; je piquai ses membres, le corps, les lèvres, avec un compas : tout était immobile, c'était la mort.

« La douleur physique m'arracha à cette fatale contemplation. Ma jambe gauche était paralysée, et j'y sentais un frémissement extraordinaire. J'éprouvais, en outre, un tremblement général, de l'oppression, des battements de cœur désordonnés. J'atteignis avec la plus grande peine le village d'Alt St. Johann. Les instruments avaient été pareillement foudroyés[3]. »

[1] Buchwalder, *Résultats de mesures trigonométriques en Suisse.* — Kaemtz, *Cours de météorologie*, traduit par Ch. Martins, p. 327. Paris, Delahays, 1858.

Exemples divers de globes fulminants produits pendant de violents orages[1].

Le 24 septembre 1772, au milieu d'un *violent orage*, on vit à Besançon un *globe de feu* volumineux traverser le magasin à blé et une salle d'hôpital et se précipiter dans le Doubs[2].

Dans la nuit du 15 juillet 1808, au milieu d'un *épouvantable orage* qui causa de nombreux désastres, un *globe de feu* emporta une des tourelles de la cathédrale de Glocester. (Howard.)

Le 14 janvier 1824, il y eut à Halle un *orage épouvantable*, accompagné de tourbillons de neige, d'éclairs, de coups de vent. On vit des feux météoriques en plein champ. Le même soir, il tomba à Hanovre un énorme *globe de feu* avec un violent coup de tonnerre et un odeur sulfureuse. (Bullmann.)

[1] Voir § 10, p. 29.
[2] Sestier, *De la foudre*.

Le 2 juin 1840, un *violent orage* éclata sur Paris, et plusieurs maisons furent foudroyées. Pendant sa durée, plusieurs ouvriers virent, dans le passage Saint-Maur, un *globe de feu* qui parut sur le sol et lança une pierre au loin[1].

Pendant le *terrible orage* qui éclata sur Paris au mois de juillet 1854, la foudre tomba sur la maison habitée par M. Léon Gatayes, homme de lettres, et s'y divisa en plusieurs rayons ; l'un d'eux *courut, semblable à un rat enflammé*, devant la loge du concierge, puis passant sous la porte cochère et traversant la rue, alla mourir sur le trottoir, où il laissa une trace légère ; d'autres rayons, sous la forme de *brandons enflammés*, rasèrent la face principale de la maison[2].

1 Peltier, *Soc. philom. de Paris*, 6 juin 1840.
2 Sestier, t. I, p. 130.

Exemples de globes de feu pouvant se rattacher à la classe des éclairs *en chapelet* [1].

Nous terminerons ces relations de cas de foudre globulaire en donnant la description d'un coup de foudre remarquable observé, à Amiens, par un savant physicien, M. le professeur Decharme, en 1884.

Ce coup de foudre a présenté les plus grandes analogies avec ceux que nous avons observés à Paris en 1876 (voir § 29 à § 35, p. 57 et suiv.) et particulièrement avec les effets de l'éclair *en chapelet* que nous avons décrit (§ 32, p. 60).

« Le 24 février 1884, après une journée relativement chaude (10°), après diverses alternatives de coup de vent (sud-ouest), de pluie, de giboulées de grésil et même de grêle, un orage éclata sur Amiens.

A 7h 45 du soir, un éclair d'une très grande vivacité illumina la ville tout entière et fut imn

[1] Voir p. 68, § 35.

diatement suivi d'un formidable coup de tonnerre qui ébranla les vitres de toutes les maisons et effraya bon nombre de personnes, autant par l'imprévu que par l'intensité du météore.

Bien que l'éclair et le coup de tonnerre aient été uniques dans cet orage, néanmoins la foudre est tombée simultanément en plusieurs endroits de la ville (assez éloignés les uns des autres) et à peu près sous la même forme insolite, toute particulière, c'est-à-dire en *fragments globulaires,* qui semblent être des diminutifs de la *foudre en boule.*

La foudre est tombée d'abord au théâtre, pendant la représentation, en traversant une vitre de fenêtre donnant sur une petite cour à l'est, du côté du Palais de justice; de là elle passa dans les coulisses, où se trouvaient plusieurs acteurs, et très près de l'un d'eux qui ne ressentit aucune commotion (cependant son pantalon a été légèrement roussi au-dessous du genou). On la vit passer durant plus d'une seconde, sous la forme d'une *petite boule de feu* bleuâtre, de 2 à 3 centimètres de diamètre, en produisant une très petite

explosion, comme celle d'une allumette qu'on enflamme, et elle disparut dans les dessous de la scène, où l'on s'assura qu'elle n'avait causé heureusement aucun dégât.

Au même moment, la foudre est tombée dans une maison particulière, située à 200 mètres environ au sud du théâtre. Entrée par une fenêtre ouverte de la cuisine, tournée vers l'ouest, elle apparut à deux personnes sous la forme d'une *petite boule de feu*, grosse comme une noisette, qui, arrivée au-dessus de la table où un jeune homme écrivait, éclata près de sa tête, avec un bruit de pétard, et disparut. Cette apparition n'avait pas duré deux secondes *lorsqu'on entendit le formidable coup de tonnerre*, et l'on reconnut avec effroi qu'on venait d'avoir la visite de la foudre sous une forme singulière. Si la frayeur fut grande, il n'y eut du moins ni accident ni dégât.

Au même instant, à 400 mètres environ du théâtre, la foudre est tombée sur une cheminée de l'Hôtel de ville (non loin des paratonnerres de édifice), au poste du Bureau central de police,

deux agents ont vu la faible lueur électrique et entendu une petite explosion comme celle d'une capsule qui éclate. C'est encore une *forme minuscule de la foudre globulaire.*

Les sonneries électriques, partant de ce Bureau central et aboutissant aux quatre extrémités opposées de la ville, furent mises en mouvement.

Dans une autre maison (sise à 150 mètres du théâtre, derrière le Palais de justice, muni de paratonnerres), une domestique qui se trouvait au moment de l'éclair devant la porte ouverte de la cuisine donnant sur une cour, a vu une flamme de couleur blanc bleuâtre, à *contours peu nettement déterminés*, qui, venant du sud-ouest, s'est précipitée sur un tuyau de gouttière contigu à la porte. C'est donc à ses pieds que cette femme a vu tomber la *boule de feu* dont la grosseur ne lui parut pas supérieure à celle d'un œuf. En atteignant le tuyau, la flamme a fait entendre un bruit aussi fort que celui d'un coup de fusil, ou mieux, d'un coup sec le gros pétard. Cette personne, saisie de frayeur, entra brusquement dans sa cuisine, et eut encore

le temps de s'asseoir avant d'entendre le violent coup de tonnerre. Il est à remarquer que du tuyau s'écoulait en ce moment une très grande quantité d'eau qui se rendait dans la rue par une longue conduite en fonte. La foudre n'a encore causé ici que de la frayeur, sans dégâts, sans laisser trace ni de fumée ni d'odeur.

Dans une troisième maison, à 270 mètres du théâtre, la foudre est entrée par la cheminée d'une cuisine, a soulevé comme une soupape le couvercle du fourneau allumé, d'où est sortie une *boule de feu*. Cette flamme était d'abord très volumineuse; mais, arrivée à 2 mètres environ du fourneau, c'est-à-dire au milieu de la cuisine, elle diminua et parut avoir la grosseur d'une orange ou même d'un œuf, puis elle éclata avec un bruit aussi fort que celui d'un coup de fusil et disparut, sans laisser ni trace, ni fumée, ni odeur, mais en causant une terrible frayeur. Tout cela s'était passé en moins de deux secondes, *entre l'apparition de l'éclair et le bruit du tonnerre.*

Un employé prenait son repas avec plusieu

personnes, dans un restaurant situé à 500 mètres du théâtre, près du chemin de fer et non loin de la gare, au moment où l'orage éclata. Il vit, un peu avant le coup de tonnerre, une *petite flamme* bleue courir au-dessus de la table avec une très grande vitesse. Ses commensaux n'eurent pas le temps de la voir. Elle se dissipa sans bruit, ne laissant aucune trace de son passage. On ne sait par où elle est entrée dans la maison; probablement par la cheminée.

Enfin, la foudre est encore tombée à une distance de 800 mètres du théâtre, dans une maison située sur le boulevard du Jardin-des-Plantes, et toujours à peu près sous la même *forme globulaire*. Elle est arrivée, on a tout lieu de le croire, par un fil de téléphone; car celui-ci a été distendu et allongé de quelques centimètres; de plus, la sonnerie à laquelle il est rattaché a été dérangée. C'est en quittant ce fil qui aboutit à la cuisine, que la foudre a produit une explosion aussi forte, au moins, que celle d'un coup de fusil ; ce n'est qu'après avoir entendu ce bruit que l'on vit une flamme

bleue[1] *(couleur de punch)* grosse comme une noix, passer de la cuisine dans la pièce voisine et faire presque le tour de la table sur laquelle plusieurs personnes prenaient leur repas ; elle effleura le maître de la maison qui en eut la main engourdie durant quelques instants ; puis elle disparut, sans laisser ni trace ni odeur. Tout ce qui précède s'était passé en moins de deux secondes et c'est alors qu'on entendit le violent coup de tonnerre qui donna l'explication du phénomène. On fut très effrayé ; une domestique en éprouva un grand saisissement.

Ainsi, bien que l'éclair ait été unique dans cet orage, la foudre est tombée, sous *forme globulaire*, *en sept endroits différents*, dont les deux plus éloignés sont à 1300 mètres environ l'un de l'autre, en ligne droite.

Il est très probable que, par suite de cette dissémination de la matière fulgurante, les paratonnerres des édifices voisins, tels que ceux du Palais de

[1] V. § 14, p. 34.

justice, de la gendarmerie et même de la cathédrale ont été frappés par quelques rayons de foudre; mais il n'ont pu protéger le théâtre qui est dépourvu de toute tige protectrice.

On peut donc conclure des faits précédents, que la foudre a présenté ici un caractère particulièrement insolite, en se divisant en *fragments globulaires* qui, par leur petitesse, sont devenus inoffensifs.

Un témoin oculaire, habitué aux observations, nous a dit avoir vu, de sa fenêtre ouverte au moment de l'éclair, une grande masse lumineuse, d'un *éclat extrêmement vif* (dont il resta ébloui pendant quelques instants), qui lui parut se diviser en une nébulosité diffuse, se portant sur divers points de la ville, précisément dans les directions des endroits mentionnés plus haut.

Il semblerait donc que, dans cette circonstance, la masse électrique a rencontré, à une certaine hauteur dans l'atmosphère, une résistance matérielle (nuage ou milieu moins conducteur), qui a déterminé la dissémination, l'éparpillement du

fluide électrique, comme un liquide, tombant sur un corps solide, se divise en gouttelettes qui sont lancées de tous côtés.

En résumé, dit M. Decharme, nous n'avons eu heureusement que la menue monnaie de la foudre en *globules inoffensifs*. Mais les globes fulminants sont d'ordinaire beaucoup plus volumineux ; aussi causent-ils parfois de grands accidents et des dégâts épouvantables[1]. »

[1] *La Lumière électrique*, 29 mars 1884, 6e année, t. XI, p. 551.

II

RELATIONS DE CHUTES DE GRÊLE

Exemples des manifestations électriques qui précèdent ou accompagnent la chute de la grêle [1].

Tessier, en parlant de l'endroit où il observa la grêle qui ravagea la France en 1788, dit :

« *La grêle suivit de près l'éclair et le coup de tonnerre* [2]. »

Elie de Beaumont, parlant d'une grêle qu'il observa en 1837, dit :

« Trois *coups de tonnerre* d'une force moyenne

[1] Voir § 51, p. 87.

[2] Rambosson, *Histoire des météores*, p. 168. Paris, Didot, 1869.

sont survenus pendant l'averse; chacun d'eux a donné lieu à un redoublement assez marqué dans la *chute des grêlons.* »

Beudant dit d'une grêle observée par lui en 1848 :

« *Un coup de tonnerre éclata et presque aussitôt le nombre des grêlons devint beaucoup plus considérable.* »

Dans la description d'un orage à Cannes, on lit :

« Le 17 mars 1883, vers 11 heures du matin, il se produisit une rencontre de deux couches nuageuses : un *éclair jaillit* et une assez forte pluie mélangée de *grêle* commença à tomber [1] »

Kaemtz [2] cite la relation suivante qui lui a été faite par M. Oswald Heer, d'un orage à grêle :

[1] *Annuaire de la Société météorologique de France*, p. 131, avril 1883, 31e année.

[2] *Cours de météorologie*, 1858, p. 354.

« J'étais avec quelques amis sur les glaciers du Glaernisch, à 2600 mètres environ au-dessus de la mer; tout à coup un *nuage noir* arrivant de l'ouest nous déroba la vue du Bachistock qui s'élève dans le voisinage. Bientôt *plusieurs coups de tonnerre formidables* firent retentir les échos du Glaernisch, et nous vîmes tomber quelques grêlons. Nous descendîmes rapidement de 300 mètres environ avant que le nuage crevât. *Nous étions entourés d'éclairs et de tonnerre, et inondés* de pluie et de grêle. Nous nous réfugiâmes sous un rocher; bientôt les nuages s'élevèrent à l'occident, formèrent un demi-cercle, au-dessous duquel nous vîmes le pays d'Uri éclairé par les rayons du soleil. En sortant de notre retraite, nous aperçûmes un second nuage qui bientôt *creva sur nos têtes avec un épouvantable fracas*. La *grêle* mêlée de pluie nous poursuivit pendant plusieurs heures. Quelques cabanes construites par des pâtres nous offrirent un asile où nous passâmes la nuit. »

M. Lucien de Puydt a écrit, dans la relation d'une chute de grêle observée à Muzo, en Colombie :

« Le 29 août 1866, à 3^h 1/2 de l'après-midi, un violent orage venant de l'ouest éclata subitement. Le soleil, qui brillait d'un vif éclat, se voila. De violents coups de tonnerre et des *éclairs intenses* se succédèrent avec rapidité ; puis une *grêle abondante* tomba pendant environ dix à douze minutes. Elle fut suivie d'une pluie torrentielle. Une demi-heure plus tard le soleil reparaissait dans son éclat accoutumé [1]. »

Nous rappellerons également un passage de la relation faite par l'ingénieur suisse Buchwalder, de l'orage à foudre globulaire observé par lui dans les montagnes, le 4 juillet 1832, à 2500 mètres au-dessus du niveau de la mer (voir p. 222) :

« Un nuage épais et noir comme la nuit enveloppait le Sentis; *la pluie et la grêle* tombaient par torrents; le vent soufflait avec fureur; les

[1] *Annuaire de la Société météorologique*, 1877, t. XXV, p. 151.

éclairs rapprochés et confondus semblaient un incendie[1]. »

Dans la relation que nous avons donnée plus haut (voir p. 206) du R. P. de Lozeran du Fesc, sur un cas de foudre globulaire observé par deux voyageurs dans les montagnes et au sein même d'un orage, nous appellerons de nouveau l'attention sur ce passage : « *Lorsque les boules de feu passaient, il tombait des gouttes de pluie aux environs, mais qui étaient beaucoup plus grosses au-dessous de ces boules*[2]. »

« Les orages de l'été de 1874, dit M. Lespiault, secrétaire de la Commission météorologique de la Gironde[3], ont été exceptionnellement désastreux

[1] Ces effets sont analogues à ceux qui ont été décrits par M. Colladon, lors des violents orages à grêle de 1875 en France et en Suisse. (Voir p. 87.)

[2] N'est-ce pas là un effet de pulvérisation ou de vaporisation par le flux électrique, pris en quelque sorte sur le fait dans la nature, et complètement analogue à celui qui se produit dans nos expériences? (Voir § 44 à 46, p. 77 à 81.)

[3] *Atlas météorologique de l'Observatoire de Paris*, 1874. Paris, Gauthier-Villars, 1875.

dans le sud-ouest de la France. Le 22 mai, une grêle intense ravageait une partie des Landes et du Lot-et-Garonne. Un mois plus tard, une nouvelle grêle, plus terrible encore, passait à peu près sur les mêmes régions.

« Le 20 juin, à 9h 30 du soir, des éclairs multipliés se montrent à l'horizon ouest de Bordeaux; à 10 heures, une épaisse muraille de nuages monta rapidement vers le zénith encore brillant d'étoiles; à 10h 30, le ciel est déjà complètement couvert, et l'on entend les premiers coups de tonnerre; les *éclairs se succèdent sans interruption*, incessamment mêlés de traits de foudre entre les nuages; le bruit du tonnerre se rapproche; vers 10h 45, *les roulements deviennent continus;* dix minutes après, commence une *pluie très abondante* qui, à 11 heures, devient *torrentielle;* elle est mêlée de *grêlons*, dont quelques-uns sont très gros.

« Les phénomènes électriques n'atteignent guère à Bordeaux ce degré d'intensité que dans les orages exceptionnels. »

« Au mois de juillet de la même année 1874, écrit encore M. Lespiault, les orages furent presque aussi fréquents que dans le mois précédent.

« Le 6 juillet, on observa un léger mouvement orageux, limité aux coteaux de Bouliac. Dans la nuit suivante, entre 1 et 3 heures du matin, le canton du département fut traversé, du sud-ouest au nord-est, par un orage qui ne se manifesta guère sur son parcours que par quelques *coups de tonnerre secs et isolés, accompagnés d'une pluie torrentielle de quelques minutes.* »

Le 2 septembre 1886, un orage traversa la Belgique en causant de grands dommages, particulièrement à Ath. Vers 3^h 1/2 du soir, le ciel *s'étant rapidement obscurci, et la foudre grondant depuis quelques instants, soudain une pluie de grêlons énormes s'abattit* sur la ville pendant environ quinze minutes. En peu d'instants, les vitres, les glaces, es persiennes, furent brisées, maintes façades enluites, criblées de trous de plus de 1 centimètre de

profondeur, des toitures de zinc furent perforées, etc.[1].

Volnay a écrit dans son *Tableau du climat et du sol des États-Unis :*

« J'ai longtemps refusé de croire à l'existence de grêlons pesant des onces et des livres, dont parlent souvent les gazettes et les voyageurs; mais l'orage du 13 juillet 1788 m'a convaincu par mes propres sens.

« J'étais au château de Pontchartrain, à quatre lieues de Versailles. A 6 heures du matin, étant allé visiter un parc de moutons, je trouvai les rayons du soleil d'une chaleur insupportable ; *l'air était calme et étouffant,* c'est-à-dire très raréfié ; le ciel était sans nuage, et cependant je distinguai *quatre à cinq coups de tonnerre.* Vers 7^h 1/4, parut un nuage au sud-ouest, puis un vent très vif. En quelques minutes le *nuage remplit l'horizon,* et accourut vers notre zénith avec un redoublement

[1] *Ciel et Terre,* septembre 1886, p. 327.

de vent alors frais, et tout à coup commença une *grêle*, non pas verticale, mais lancée obliquement comme par 45°, d'une telle grosseur que l'on eût dit des plâtres jetés d'un toit que l'on démolit. Je n'en pouvais croire mes yeux; nombre de grains étaient plus gros que le poing d'un homme, et je voyais qu'un ou plusieurs d'entre eux n'étaient que les éclats de morceaux plus gros. Lorsque je pus avancer la main en sûreté hors de la porte de la maison, où fort à temps je m'étais réfugié, j'en pris un, et les balances qui servaient à peser les denrées m'indiquèrent le poids de plus de cinq onces; sa forme était très irrégulière; trois cornes principales, grosses comme le pouce et presque aussi longues, prédominaient du noyau qui les rassemblait. »

Exemples du bruissement qui précède ou accompagne la chute de la grêle[1].

Quelques auteurs anciens, tels qu'Aristote et

[1] Voir § 54, p. 90.

Lucrèce, ont déjà dit qu'on entendait un *bruit très fort* lorsqu'un nuage chargé de grêle s'approche du zénith. Des observations modernes ont confirmé cette assertion. Ce bruit n'est ni celui de la tempête ni le roulement du tonnerre; il est quelquefois tellement fort qu'il couvre celui du tonnerre [1].

Le 7 mai 1865, un orage à *grêle* dévasta la vallée de l'Escaut.

« A 3 heures, dit M. Lermoyer, ingénieur, de gros nuages formant des couches superposées, se montrèrent au sud-ouest, et bientôt le tonnerre se fit entendre. Au-dessus de leur masse se dressait un épais cumulus d'un blanc livide, dans lequel

[1] Kaemtz, *Cours de météorologie*, p. 356.

On a généralement attribué ce bruissement au choc des grêlons entre eux. Nous avons expliqué, § 54, qu'il était dû, suivant nous, à la pénétration d'un flux électrique abondant dans les masses nuageuses. L'aigrette électrique elle-même produit un bruit marqué.

Dans la célèbre expérience du 7 juin 1753, faite à Nérac par le physicien de Romas, à l'aide d'un cerf-volant électrique lancé au milieu d'une nuée orageuse, et qui fournit de temps à autre d[...] lames de feu accompagnées de détonations, une sorte d'atmosph[...] lumineuse de 4 pouces de diamètre enveloppait la corde et *un br[...] comparable à celui d'un soufflet de forge* se faisait entendre.

se produisait *un pétillement continu d'éclairs ;* en dessous plusieurs couches de nuées, de teintes sombres, s'approchant du sol, formaient une large base à cette sorte de pyramide. Le roulement du tonnerre était continu, mais sans intensité ni fracas ; un fourmillement non interrompu d'éclairs engendrait une espèce de *crépitation*[1] sans intermittence, et les explosions semblaient se concentrer dans l'intérieur de la plus forte nuée[2]. »

Exemples des mouvements qui se produisent dans les nuages pendant les chutes de grêle[3].

MM. Rozet et Hossard, officiers d'état-major, ont eu souvent l'occasion d'observer, pendant leurs travaux topographiques dans les Alpes et les Pyrénées, que « de longues colonnes de vapeurs ou

[1] Dans notre expérience de la *gerbe* de globules aqueux (§ 44, p. 77), on retrouve exactement cette *crépitation* produite par le feu électrique à la rencontre de la surface du liquide.

[2] *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1865, t. LX, p. 1020, et *e Monde physique*, par Amédée Guillemin, t. III, p. 515. Paris, Hachette, 1883.

[3] Voir § 52, p. 89.

trombes internubaires surgissent parfois *comme des fusées*, jusqu'à la couche des cirrus, et sont un signe assuré de la prochaine explosion d'un orage[1] ».

« Lorsque le mauvais temps est prochain, dit M. Rozet, les cirrus descendent en passant à l'état de cirro-stratus, et de la surface supérieure des cumulus, où se manifestent des *mouvements violents*, s'élèvent des colonnes qui, parvenues à une certaine hauteur, s'étalent en champignons. Si ces champignons sont nombreux, ils se réunissent et forment une couche plus ou moins régulière. Cette dernière pousse bientôt en haut des ramifications qui vont au-devant des cirrus tombants, et alors, souvent *au milieu des éclairs et du tonnerre, il se forme des nimbus* qui n'offrent plus qu'une grande confusion accompagnée de mouvements violents dans la masse et de vents froids soufflant dans diverses directions[2]. »

[1] *Trombes et Cyclones*, par Zurcher et Margollé, p. 36. Paris, Hachette, 1876.

[2] *De la pluie en Europe*. Paris, 1855.

L'observation suivante a été faite, par Lecoq, professeur à la Faculté de Clermont, pendant qu'il se trouvait sur le sommet du Puy-de-Dôme :

« En face de moi, dit-il, je vis distinctement, à 50 mètres, la *grêle* se précipiter des nuages inférieurs et tomber sur le sol. Le nuage qui la laissait épancher avait les bords dentelés et offrait, dans ses bords mêmes, un mouvement de tourbillonnement qu'il est difficile de décrire. Il semblait que chaque grêlon fût chassé par une répulsion électrique ; *les uns s'échappaient par-dessous, les autres en sortaient par-dessus ; enfin ils partaient dans toutes les directions.*

« *Après cinq ou six minutes* de cette agitation extraordinaire, à laquelle les bords antérieurs des nuages semblaient seuls participer, *la grêle cessa*, l'ordre se rétablit, et le nuage à grêle, qui n'avait pas cessé de s'avancer très vite, continua sa route vers le nord, laissant apercevoir quelques traînées de pluie qui arrivaient à peine sur le sol, et paraissaient plutôt se dissoudre dans la couche inférieure de l'atmosphère. »

Exemples de pluie ou de grêle lumineuse ou phosphorescente [1].

Peltier relate avoir reçu quelquefois dans un vase isolé, attenant à un électroscope, de ces larges gouttes de pluie qui n'apparaissent que dans les temps orageux, et constaté qu'une seule de ces gouttes suffisait pour projeter les feuilles d'or contre les armatures.

D'autre part, Toaldo rapporte, dans son *Essai météorologique*, que, le 22 septembre 1773, il tomba, dans la Gothie orientale, une pluie *dont chaque goutte jetait du feu* en tombant à terre.

Perraut rapporte, d'après Krank, un exemple de *grêle enflammée*.

Dans la relation des violents orages de grêle, du 7 au 8 juillet 1875, en Suisse et en France, M. Colladon écrit : « Des phénomènes intenses de phosphorescence électrique ont été remarqués avant et

[1] Voir § 62, p. 96.

pendant la grêle, sur le sol, sur des animaux, sur des objets saillants ; *les grêlons aussi étaient phosphorescents*. Une odeur d'ozone très violente a été remarquée immédiatement après la grêle... Les cas de chute de foudre ont été remarquablement rares; les décharges électriques incessantes se faisaient d'un nuage supérieur à des nuages immédiatement inférieurs d'où tombait la grêle, et l'on n'entendait que de très rares détonations[1]. »

Exemples de la courte durée des chutes de grêle sur un même point[2].

On pourrait en mentionner un nombre infini d'exemples ; car c'est une des circonstances qui caractérisent les chutes de grêle. Nous en avons déjà cité quelques cas (voir note de la page 93); nous nous bornerons à ajouter les suivants :

Lors du terrible orage de grêle du 13 juillet 1788,

[1] *Comptes rendus*, 1875, t. LXXXI, p. 105.
[2] Voir § 57, p. 93.

il fut constaté que la *grêle ne tombait sur chaque point que pendant sept ou huit minutes.*

Le 26 mai 1886, à Bordeaux, après une journée orageuse, le *ciel s'obscurcit* vers 4h 30; à 5 heures, on remarqua quelques *éclairs* accompagnés de pluie et quelques roulements de tonnerre lointain. Vers 5h 30, une grêle s'abattit sur le sol, cassant les vitres, brisant les tuiles et les ardoises, blessant les passants, etc. *La chute* des grêlons *n'a duré que quelques minutes*[1].

Le 25 février 1884, à 1 heure de l'après-midi, nous avons observé, à Paris, une chute de grèle qui n'a pas duré plus de deux à trois minutes.

Le même jour, à 1h 1/2, une autre giboulée de grêle plus grosse se produisit et ne dura pas plus longtemps. Les grêlons neigeux et opaques étaient en forme de pyramides à base sphérique. Le tonnerre se faisait entendre dans le

[1] Extrait d'une relation adressée à M. G. Tissandier, *Bulletin d la Société météréologique*, juillet-août 1886, 34e année, p. 243.

lointain ; ce n'était probablement que l'un des bords ou la queue d'une gerbe de grêle, car il ne grêlait pas à quelques mètres du point où nous étions.

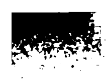
Le 10 avril de la même année, nous observions encore aux environs de Paris une très forte *grêle* qui ne dura pas plus de deux ou trois minutes. Les grêlons avaient la même forme que précédemment. A Paris même, du moins sur la majeure partie de sa surface, il n'y eut pas de chute de grêle.

Exemples de chutes de grêle en bandes séparées par une bande de pluie [1].

Quoique le plus souvent les orages de grêle soient très limités, il est des cas où ils s'étendent très loin, mais même dans ces cas exceptionnels, c'est en longueur et jamais en largeur que l'averse a ses plus grandes dimensions [2].

1 Voir § 58, p. 93.

2 *Traité d'électricité*, par A. de la Rive, t. III, p. 172. Paris, J.-B. Baillière et fils, 1858.



L'un des cas les plus remarquables est celui du fameux orage de grêle qui traversa la France et la Hollande le 13 juillet 1788, sur une longueur de 1000 kilomètres ; il se propagea simultanément sur deux bandes à peu près parallèles dirigées toutes les deux du sud-ouest au nord-est.

La première, plus étroite, avait pour largeur moyenne 2 lieues 1/4 ; la seconde, pour largeur moyenne, 3 lieues ; elles étaient séparées par une bande qui ne reçut qu'une pluie abondante et dont la largeur moyenne était de 5 lieues 1/4.

Tous les points ne furent pas frappés à la fois, mais on reconnut que l'orage avait une marche très rapide depuis les Pyrénées où il avait pris naissance jusque dans la Baltique, où l'on en perdit la trace ; sa vitesse était de 16 lieues 1/2 à l'heure. Les grêlons différaient en forme et en dimension.

Les ravages que causa cet orage furent considérables ; il y eut en France 1039 paroisses dévastées, et le dommage qu'elles éprouvèrent fut évalué à 24 690 000 francs.

Dans l'été de 1852, un orage d'une nature semblable traversa la Haute-Marne, en se dirigeant du sud-ouest au nord-est et ravagea les campagnes de vingt-huit communes.

Il y eut aussi, comme dans l'orage de 1788, *deux bandes de grêle séparées par une bande de pluie*[1].

1 *La grêle*, par l'abbé Raillard (*Annuaire de la Société météorologique*, t. XIII, p. 292, 1865).

III

RELATIONS DE TROMBES ET DE CYCLONES

Exemples de trombes précédées ou accompagnées de manifestations électriques[1].

M. Ch. Page, navigateur, a écrit :

« J'ai rencontré dans la Méditerranée, et surtout entre les tropiques des *trombes chargées d'électricité et lançant des éclairs ; quelquefois la foudre les sillonnait dans toute leur hauteur, et serpentait jusqu'à la mer*[2]. »

M. Debrun, professeur d'histoire naturelle, a

[1] Voir § 67 à § 86, p. 103 à 135.
[2] *Les Trombes*, par A. Peltier, 1840, p. 274.

donné la description suivante d'une trombe, observée au sud de Paris, le 16 mai 1886[1] :

« Cette trombe était de la couleur du blanc grisâtre des nuages ordinaires et ressortait très bien du fond noirâtre des nuées qui étaient plus loin au sud.

« Ce qui frappa le plus mon attention, ce fut de voir qu'elle formait un *long tuyau*, en partie demi-transparent, prenant plusieurs courbes ou inflexions, assez semblable à un long boyau flexible dans lequel *je voyais monter les vapeurs* par ondulations, *comme on verrait la fumée s'élever dans un tuyau de poêle qui serait de verre ;* ce qui était fort remarquable, c'est que l'ascension des vapeurs était bien plus active dans la partie la plus proche de la terre, et le mouvement y était extrêmement visible ; cette extrémité inférieure pouvait être alors à 300 pieds environ au-dessus de terre.

« *Les vapeurs s'élevaient dans cette trombe* sans

[1] *Ibid.* p. 336.

qu'il me fût possible de voir d'où elles provenaient... Mais elle offrait quelque chose de bien plus singulier encore, c'était de présenter dans le centre de son intérieur et dans toute sa longueur, *un sillon ou canal blanchâtre lumineux de l'éclat de la lune*...[1] »

« Le 19 avril 1827, au matin, d'après M. Scoresby, un orage assaillit le paquebot *le New-York*. Il était grand jour; mais les nuages qui enveloppaient de toutes parts le navire étaient si noirs et si épais, que l'*obscurité* régnait au milieu de nous. La pluie tombait par torrents, mêlée à des *grêlons* aussi gros que des noisettes. *Des éclairs* brillaient de tous côtés, accompagnés presque au même instant de coups de tonnerre.

« D'immenses nuages de vapeur *s'élevaient de la mer* et formaient dans l'air une multitude de colonnes grisâtres.

« La mer était dans un bouillonnement conti-

[1] Voir § 76 et suiv., p. 120 et suiv.

nuel comme par l'action d'une quantité de petits volcans sous-marins. Ce devait être un phénomène électrique du même genre que les trombes. On aperçut, en effet, *trois colonnes d'eau qui s'élançaient dans les airs*, et puis retombaient en écumant dans la mer qu'elles agitaient avec force. La scène qui se passait en ce moment était épouvantable ; les éléments semblaient s'être combinés pour la destruction de tout ce qui se trouvait sur la surface de la mer. »

M. Dutour, l'un des observateurs de la trombe de Châtenay (Seine-et-Oise), du 18 juin 1839, constata que l'extrémité du cône de la trombe était terminée par une *calotte de feu* qui paraissait être à 8 mètres de la terre[1].

M. Duncan Matheson, officier de dragons, en résidence à Norwich (Angleterre), a donné la description suivante d'une trombe observée par lui, dans le courant du mois de juillet 1880 :

1 *Les Trombes*, par A. Peltier, p. 157.

« Je me trouvais, dit-il, auprès des fusils réunis en faisceaux, lorsqu'un *orage très intense* éclata tout à coup. Presque aussitôt je vis se former une *trombe* qui s'avançait sur nous. Pendant une demi-heure environ, il me fut donné d'observer ce curieux phénomène qui paraissait se produire à 800 mètres de distance. Après ce temps écoulé, la trombe s'éleva subitement en se contractant et disparut peu à peu, paraissant se dissoudre dans le nuage. Cette trombe était d'un gris métallique assez brillant ; elle se détachait d'un nuage orageux très foncé et d'où jaillissaient *des éclairs*. Pendant toute la durée du phénomène, l'atmosphère paraissait très chargée d'électricité, et suivant l'expression vulgairement usitée, l'air était très lourd [1]. »

Le 16 février 1885, écrit M. E. Vincent [2], une trombe a exercé ses ravages aux environs d'Argentan (Orne) :

[1] *La Nature*, 8e année, 4 septembre 1880, p. 213.

[2] *Comptes rendus*, mars 1885, t. C, p. 668.

« Vers 4 heures de l'après-midi, *plusieurs coups de tonnerre* se firent entendre, venant du sud-ouest, puis un nuage noir s'avança rapidement présentant à sa base des *appendices* inégaux. La nuit se fit presque complète. Tout à coup, les habitants du village de Bois-Morel virent une sorte de fumée blanchâtre s'avancer en rasant le sol et renversant tout sur son passage: Les couvertures en chaume furent ouvertes et les pailles projetées au loin; un hangar fut soulevé et renversé. Les tuiles des autres couvertures volaient à plus de 50 pieds en l'air, les portes se renfonçaient de plus de 2 pouces, ainsi que les fenêtres dont les carreaux volaient en éclats. Cela ne dura que quelques instants.

« Quand les habitants sortirent, ils furent épouvantés des ravages accomplis par la trombe.

« Sur une largeur moyenne de 250 à 350 mètres tous les pommiers, poiriers, chênes énormes, hêtres étaient renversés. Des poiriers avaient éclaté, des chênes avaient été tordus et partagés en fragments de la grosseur d'un crayon à dessin. »

Le 28 octobre 1885, une autre trombe a été encore observée par M. E. Vincent dans le même département[1].

« Vers 11h 1/4 du matin, le ciel devint tout noir, *quelques coups de tonnerre lointains se firent entendre,* annonçant un orage qui approchait. Au milieu d'une nuit à peu près complète, *un violent coup de foudre* fit connaître l'arrivée subite de la tourmente. Bientôt on aperçut une sorte de *fumée blanchâtre* au centre de laquelle les spectateurs terrifiés distinguèrent une énorme *boule* jetant des milliers d'étincelles dans tous les sens et qui s'avançait avec une rapidité extraordinaire. Les ardoises s'entre-choquent sous l'effort d'un *appendice mobile* qui termine la colonne blanchâtre, et s'émiettent en un instant. Au Val-de-Rouvre, plus de cinquante arbres ont été enveloppés par la *colonne mobile* qui les a complètement dégarnis en ne leur laissant intact que le tronc. Des grêlons de la grosseur d'un

[1] *Annuaire de la Société météorologique*, février 1886, 34e année, p. 70.

œuf de poulette ne cessent de tomber, hachent les pommes et les poires et brisent les carreaux et les toits. »

Exemples des effets d'aspiration et du mouvement gyratoire des trombes.

Le 6 septembre 1814, le capitaine Napier, étant en mer, eut l'occasion d'observer une trombe : « Sa forme était cylindrique, et l'*eau de la mer s'y élevait avec rapidité*. Parvenue à 1 mille du navire, elle s'arrêta pendant plusieurs minutes. La mer, à sa base, parut, dans ce moment, en ébullition et formait beaucoup d'écume. Des quantités considérables d'eau étaient transportées jusqu'aux nuages ; une espèce de sifflement s'entendait. La trombe en masse semblait avoir *un mouvement en spirale fort rapide*[1]. »

M. Liais a observé en 1852, à Cherbourg, *un raz de marée,* pendant lequel la mer avait baissé,

[1] A. Peltier, *Des trombes*, etc., 1840, p. 260.

en 10 minutes, autant qu'elle le fait ordinairement en 2 heures, pendant qu'un *orage intense* s'éloignait du rivage ; ce que l'on a attribué à l'action des nuages, attirant les eaux vers la pleine mer.

On a vu, pendant certains orages, l'eau de la mer *s'élancer en forme de cône,* puis retomber en écumant, pour être soulevée de nouveau[1].

M. Lorinet, instituteur à Moncetz (Marne) a donné la description d'une trombe qui a dévasté cette localité le 19 octobre 1874[2].

La trombe a pris naissance, à 4h 40 du soir, *à la suite d'un violent orage*. La rencontre de deux petits nuages noirs très bas, rencontre marquée par un éclat de tonnerre qui renversa deux personnes, paraît avoir déterminé la formation du phénomène.

Le météore ressemblait à une colonne de fumée

[1] A rapprocher de l'expérience décrite, p. 112, fig. 23. Voir aussi § 84, p. 131.

[2] *Nouvelles météorologiques*, publiées par la Société météréologique de France, 22 décembre 1874, p. 31.

noire et épaisse, se mouvant avec une vitesse de 30 kilomètres à l'heure et *animé d'un mouvement de gyration*.

Plusieurs personnes se sont trouvées sur le passage de la trombe, n'ont pu l'éviter et ont été *soulevées* à 2 mètres de hauteur, puis entraînées avec une vitesse vertigineuse au milieu d'une obscurité profonde. Lorsqu'elles se sont relevées, affreusement contusionnées, elles étaient couvertes d'une matière noire, exhalant une odeur de soufre très prononcée.

La puissance du météore est encore attestée par ces faits, qu'une pièce de chêne pouvant cuber 2 décistères a été transportée à 3 kilomètres de distance et qu'un chevron, détaché d'un des bâtiments de Moncetz, a pénétré avec une force prodigieuse dans le mur d'une ferme située à 4 kilomètres.

L'électricité, ajoute M. Lorinet, semble avoir joué le plus grand rôle dans tous ces phénomènes; au moment du choc des deux petits nuages, qui a provoqué la formation de la trombe, un champ

situé à 500 mètres du passage de la trombe a été couvert, pendant deux ou trois secondes, d'*étincelles* qui paraissaient s'élever à 0^{m},50 du sol.

M. le professeur de Tastes a donné la description suivante d'une *trombe* qui s'est manifestée aux environs de Tours[1].

Le 25 mai 1876, vers 3 heures du soir, le temps étant très calme, un groupe de nuages d'aspect orageux se forma au zénith de Tours. Il fut sillonné de quelques éclairs suivis de quelques roulements de tonnerre peu intenses. Une assez forte ondée mêlée de quelques grains de *grêle* avec *quelques intermittences* et *quelques redoublements*, persista ensuite pendant trois quarts d'heure.

Mais tandis que les phénomènes orageux au-dessus de la ville de Tours affectaient une allure aussi modérée, une *bande de grêle très étroite et très courte* traversait la Loire ; des coups de tonnerre d'une effrayante intensité retentissaient au-dessus de la commune de Rochecorbon.

[1] *Nouvelles météorologiques*, 6 juin 1876, 9e année, p. 109.

A ce moment, 3^h 1/4 environ, un amas de vapeurs blanchâtres, dont la teinte contrastait avec la couleur sombre des nuages, se dirigea vers le sol en affectant la forme d'un cône renversé. Sa pointe s'allongea en une longue colonne mince et flexueuse, dont l'extrémité inférieure se rapprochait du sol et remontait vers le nuage par un mouvement oscillatoire assez régulier.

Au moment où la queue de la trombe passait sur la Loire, l'omnibus de Vouvray, rempli de voyageurs, fut forcé de s'arrêter, les chevaux refusant de marcher et le conducteur restant stupéfait devant un spectacle qui s'offrait pour la première fois à ses regards. Ce conducteur, homme d'un âge mûr, tout à fait digne de confiance et qu'on n'accusera certainement pas d'avoir à l'endroit de la théorie des trombes des idées préconçues, vit distinctement *une lueur partir de la surface de l'eau* vers la queue du météore, et l'*eau se soulever de bas en haut* en une colonne blanchâtre qu'on pourrait assimiler, d'après sa description, à la colonne d'eau pulvérisée qu'on voit par le regard de l'in-

jecteur Giffard, en même temps que l'eau du fleuve *tourbillonnait* violemment autour de *la colonne aspirée.*

Quand le météore, après avoir traversé le fleuve, passa sur une vaste grève, il souleva le sable en tourbillons comme il avait soulevé l'eau ; il traversa l'île de la Loire, puis se dissipa complètement.

Mon collègue, M. Pillet, professeur de mathématiques au lycée de Tours, vit de chez lui la formation et la marche du météore, à une distance de 3500 mètres. Au moment où il contemplait les bizarres oscillations de la longue queue de la trombe qui s'allongeait vers le sol, et remontait vers le nuage, il vit tout d'un coup une colonne sinueuse, blanchâtre et transparente, réunir le nuage au sol, puis cette colonne *noircir progressivement de bas en haut.* La poussière, l'eau ou le sable qui rendaient ainsi cette colonne opaque, *s'élevaient donc évidemment de bas en haut.*

Un des voyageurs de l'omnibus de Vouvray s'exprima ainsi : L'eau était animée, *au bas de la*

colonne, d'un mouvement gyratoire très violent, comme si elle eût été dans un seau et qu'on lui eût imprimé un mouvement rapide avec la main, et elle fut *aspirée avec une telle force* qu'elle montait en fumée.

Le 14 septembre 1876, M. Joseph Lafosse a observé une trombe au large de la baie des Veys (Manche).

Le temps était couvert, un gros nuage obscur occupait le zénith ; de ce nuage descendait une traînée légèrement oblique, une sorte de queue prolongée en pointe vers la mer. Avec une lorgnette, *cet appendice offrait l'aspect d'un cylindre creux* dans son milieu. La trombe augmentait insensiblement de longueur. M. Lafosse *vit alors distinctement une sorte de cône nuageux qui s'élevait de la mer et montait vers la pointe de la trombe.*

La durée du phénomène a été d'une petite demi-heure ; la teinte foncée de l'appendice s'est amoindrie peu à peu et finit par disparaître. La trombe

semblait presque immobile, au moins du point où on l'observait[1].

M. C. G. Fineman a donné la description d'une trombe qui s'est produite, le 7 juin 1882, dans la vallée de Sœby, située dans la préfecture de Jonkoping (Suède).

Il a été bien constaté que le sens de la rotation de l'air, dans cette trombe, *a été inverse de celui des aiguilles d'une montre*[2].

Le 21 août 1885, une *trombe* a été observée à Shanghaï[3].

Le temps était à l'orage, écrit M. le commandant Markal, et un gros nuage noir s'avançait de l'est vers l'ouest. Devant ce nuage on voyait une trombe qui paraissait comme une *colonne de fumée* d'une cen-

[1] Lettre de M. Lafosse, communiquée par M. Hervé Mangon à la Société météorologique de France (*Annuaire* de la Société, t. XXV, p. 118, 1877).

[2] *Annuaire de la Société météorologique de France*, 32e année, p. 123, 1884.

[3] *Comptes rendus*, octobre 1885, t. CI, p. 759.

taine de mètres de diamètre. Elle atteignit deux navires dont les tentes furent *soulevées en l'air*, et on les voyait flotter à 150 mètres ou 200 mètres de hauteur. Puis la trombe continua sa course et ne tarda pas à disparaître.

Le R. P. Marc Dechevrens observa la même trombe à terre, et cinq minutes après vit une seconde *trombe* descendant de la bordure des nuages noirs qui passaient sur la ville. Elle n'était point compacte comme la première, mais transparente et toute formée de filets vaporeux minces s'enchevêtrant les uns dans les autres. Ces filets constituaient une sorte de gaine cylindrique ayant un *mouvement gyratoire parfaitement marqué*, en *sens inverse des aiguilles d'une montre*, et le tout montait en même temps. Le pied de cette trombe secondaire n'atteignait pas le sol; mais, dans son prolongement, une sorte de colonne vague, très vaporeuse, comme de la fumée peu épaisse, paraissait manifestement attirée vers la trombe. Cette trombe se dissipa sur place au bout de trois à quatre minutes.

Exemples des manifestations électriques qui précèdent ou accompagnent les cyclones[1].

Selon tous les météorologistes[2], des *cirrus* précèdent généralement les *cyclones*. Ces nuages prennent bientôt la forme de *cumulus* et de *cumulo-nimbus*, sillonnés de *pâles éclairs*[3].

L'air devient lourd, étouffant. L'impression produite sur les animaux est surtout remarquable. Ils paraissent agités par une vive anxiété; on voit les oiseaux de mer rallier la côte et y chercher un abri contre la tempête qu'ils pressentent.

Piddington cite de nombreux exemples de *cyclones* annoncés par des bancs de nuages s'étendant à l'horizon en *manifestant des effets électriques d'une grande intensité*.

« *Des décharges électriques continues, que n'a*

1 Voir § 78, p. 123.

2 Zurcher et Margollé, *Trombes et Cyclones*, 1876, p. 192.

3 On retrouve ces effets pour ainsi dire, en miniature, dans les orages à grêle du midi de la France. (Voir notre note de la page 90.)

jamais pu soupçonner un physicien européen[1], ajoute-t-il, ne sont nullement rares dans les climats tropicaux. Dans la mer de Java, au large de la côte sud de Bornéo, on peut dire, sans exagération, que les *éclairs s'écoulent des nuages en cascades ou en colonnes*, et par quatre ou cinq endroits à la fois. Dans la rade de Madras, *les décharges de nappes d'éclairs sont incessantes quelquefois pendant des heures*[1]. »

1 C'est précisément à l'aide de *courants électriques continus de haute tension*, au lieu de simples décharges des machines électriques ordinaires et des batteries de Leyde, que nous avons cherché à imiter les grands phénomènes électriques de l'atmosphère.

Quand les expériences que nous avons décrites seront plus connues, et répétées plus facilement avec les courants de haute tension, fournis par les puissantes machines dynamo-électriques dont on dispose aujourd'hui, nous avons lieu d'espérer que nos théories, basées sur ces expériences, seront adoptées par la plupart des météorologistes.

Parmi ceux devant qui nous les avons répétées, à l'aide de nos appareils, il y une douzaine d'années, nous citerons le très regretté Charles Sainte-Claire Deville, qui nous a franchement déclaré qu'avant d'avoir vu ces expériences, il ne soupçonnait pas l'importance du rôle que pouvait jouer l'électricité dans les phénomènes météorologiques.

2 L'opinion de Piddington est que les cyclones sont des phénomènes purement électriques. *(Guide du marin*, p. 27.)

Dampier a écrit au sujet des *cyclones* ou *typhons* du Tonkin.

« Avant le commencement du typhon, un nuage épais se forme dans le nord-est; il est très noir auprès de l'horizon, d'une couleur cuivrée vers son bord supérieur, et de plus en plus clair jusqu'à sa limite, où il est d'un blanc très vif. Ce nuage inquiétant et menaçant se voit quelquefois douze heures avant l'arrivée du *tourbillon*. Il est accompagné de *terribles coups de tonnerre, de larges et fréquents éclairs*, et d'une pluie très épaisse. »

Les mouvements tournants, appelés par les Espagnols *tornados*, sont de véritables *cyclones*.

D'après les notes recueillies par le médecin anglais Boyle, pendant une station à Sierra-Leone, « l'approche des *tornados* est annoncée par l'apparition d'une *petite tache claire* de couleur argentée, *(œil de bœuf)* qui, se montrant d'abord à une grande hauteur dans le ciel, s'accroît bientôt et descend vers l'horizon avec un mouvement graduel, lent mais visible. En approchant, elle s'entoure d'un

anneau noir, qui s'étend dans toutes les directions et finit par l'envelopper dans une impénétrable obscurité. La vie semble alors suspendue sur la terre et dans l'atmosphère ; une inquiète attente oppresse tous les êtres. L'esprit resterait abattu sous le coup d'une terreur anticipée, s'il n'était relevé par l'éclair d'une *large flamme électrique,* par les grondements *de la foudre* qui se rapproche rapidement et *dont les éclats deviennent formidables*. A ce moment, un *tourbillon* se précipite avec une incroyable violence de la partie la plus sombre de l'horizon, enlevant les toits, brisant les arbres et désemparant les navires qu'il surprend[1]. »

Reid a décrit ainsi les phénomènes qui accompagnèrent le cyclone des Barbades, le 10 août 1831[2].

A 7 heures du soir, le ciel était clair et le temps calme ; ce calme dura jusqu'après 9 heures, moment où le vent souffla du nord ; vers 10^h 1/2, on aper-

1 Marié-Davy, *Les Mouvements de l'atmosphère et des mers*, p. 392. Paris, Masson, 1866.

2 Zurcher et Margollé, *Trombes et Cyclones*, 1876, p. 206.

cevait de temps en temps des *éclairs* dans le nord-nord-est et dans le nord-ouest... Après minuit, *les éclairs* et *les coups de tonnerre se succédaient avec une rapidité effrayante.* Vers 1 heure du matin, la *foudre éclatait dans toutes les directions.* Vers 3 heures, les éclairs ayant cessé pendant quelques instants et en même temps que le vent, l'obscurité devint effrayante. On vit quelques météores tomber du ciel; un surtout d'une forme sphérique et d'un rouge foncé, sembla descendre verticalement d'une grande hauteur; en approchant de terre, il se divisa en mille morceaux comme du métal en fusion et s'éteignit immédiatement.

Quelques minutes après l'apparition de ce phénomène, le bruit assourdissant du vent se changea en un rugissement lointain, et *les éclairs prenant un effrayant développement, une vivacité et un éclat extraordinaires, couvrirent tout l'espace entre les nuages et la terre pendant près d'une demi-minute.*

Immédiatement après cette prodigieuse succession d'éclairs, l'ouragan éclata de nouveau de l'ouest avec une violence terrible et indescriptible, chas-

sant devant lui des milliers de débris de toute nature. Les maisons les plus solides furent ébranlées dans leurs fondements, et toute la surface de la terre trembla sous la force de cet effrayant fléau destructeur.

Dans les forts orages aux États-Unis, pendant les mois de juillet et d'août, *l'atmosphère est tellement électrique* que le fer exposé à l'air dans les grandes fabriques et dépôts s'aimante fortement. M. Mériam a fait mention d'un fait digne d'être connu. Il dit que pendant un grand orage qui eut lieu le 19 juin 1848 à Trenton (New-Jersey), et qui embrassa 1 100 kilomètres, tout le fer contenu dans une manufacture appartenant à M. Peter Cooper se chargea d'électricité. Un ouvrier voulut relever une chaîne et il fut lancé par terre; un second ouvrier essaya d'en faire autant et il eut le même sort, enfin un troisième reçut un rude choc. Le fourgonnier reçut un autre choc quand il toucha le fer liquéfié. M. Mériam dit avoir été informé par un manufacturier qui a travaillé le fer pendant plus

de quarante ans, que chaque fois qu'une forte *tempête électrique* a lieu, on entend un bruit sourd et métallique parmi les masses de fer placées sur le sol[1].

Le commandant Macé s'exprime ainsi dans la relation d'un *cyclone* rencontré par son navire, *le Salazie*, à 500 milles de l'île Maurice, du 9 au 10 février 1884 :

« *Le Salazie* partit de Port-Louis (île Maurice) le 8 février 1884. Le 9, à 4 heures du soir, une tempête s'approche. A 8 heures du soir, coup de vent. Le vent cyclonique *tourne dans le sens des aiguilles d'une montre;* pluie torrentielle. Le 10 février, à 3 heures du matin, l'ouragan devint d'une grande violence : *nombreux éclairs, tonnerre fréquent;* la foudre tombe à plusieurs reprises auprès du navire; *de superbes arcs voltaïques* surgissent entre la surface de la mer et le poids qui termine le paratonnerre de misaine[2]. »

1 A. Poey, *Sur les tempêtes électriques*, etc. (*Annuaire de la Société météorologique de France*, t. III, p. 50).

2 *Annuaire de la Société météorologique*, 32e année, p. 253. Août 1884.

M. E. Sorel a adressé à *la Nature* la relation d'un orage en forme de couronne de 35 kilomètres de diamètre environ, qui éclata sur le Havre, le 31 mai 1886 [1]. La colonne tournait *en sens inverse des aiguilles d'une montre*. Le soir il se manifesta une *trombe* qui n'atteignit pas la terre; elle laissa seulement tomber verticalement une masse de grêle qui, en peu d'instants, sur 6 kilomètres de parcours, et sur 1 kilomètre de large, causa 200 000 fr. de dégâts. Cette trombe peu intense se détachait bien sur le crépuscule. *Les manifestations électriques étaient très remarquables;* plusieurs éclairs ont affecté la *forme globulaire;* un de ces globes s'est décomposé en traits de Jupiter qui ont foudroyé une maison située rue de l'Hôpital.

M. Antoine d'Abbadie a communiqué à la Societé météorologique de France [2] la relation suivante, faite d'après le *Galignani's Messenger*, d'un cyclone des États-Unis, et qui montre la violence que

[1] *Un orage au Havre (La Nature*, juin 1886, p. 47).
[2] *Annuaire de la Société météorologique*, 31e année, juin 1883, p. 204.

peuvent acquérir ces redoutables météores dans certaines régions :

« Le nombre et la violence des cyclones qui, partis du Missouri, ont traversé les États d'Illinois et de Wisconsin le 18 et le 19 mai 1883, sont au delà de ce qu'on avait observé jusqu'alors dans le pays. On porte le nombre des morts à cinquante-quatre et celui des blessés à deux cents.

« Vers 4 heures de l'après-midi, un *violent orage électrique* passa dans le voinage de la ville de Racine, dans le Wisconsin, et les observateurs remarquèrent *deux énormes nuages d'un noir d'encre* qui traversaient le ciel dans des directions opposées : l'un venant du nord-est, l'autre du sud-ouest. Les deux nuages se rencontrèrent avec un bruit qui a été comparé à celui de plusieurs trains de chemin de fer passant à la fois sur un pont. Ce bruit terrible, qui porta la terreur au loin, se prolongea pendant deux minutes environ, et se termina par un *coup de tonnerre* semblable à la décharge d'un coup de canon de gros calibre. Les nuages restèrent un moment stationnaires, puis

se mirent *à tourner*, en se dirigeant vers le nord, formant un *tourbillon* d'un quart de mille de diamètre. Ils touchaient de temps en temps la terre, pendant qu'ils poursuivaient leur course folle. La vitesse du cyclone augmentait à mesure qu'il approchait de la ville de Racine; il ressemblait alors à *un énorme tuyau de 500 pieds de haut*, au sommet duquel *les éclairs jaillissaient*, de telle sorte que l'idée d'une cheminée gigantesque de hauts fourneaux surgissait à l'esprit. L'orage enlevait tout ce qui se trouvait sur son passage dans la ville; la cheminée de brique d'une usine fut transportée à une distance de trois quarts de mille; un chêne de 2 pieds de diamètre projeté à travers une maison; plusieurs bâtiments furent mis sens dessus dessous, tandis que d'autres tournèrent sur eux-mêmes. Une maison, probablement prise dans le centre du tourbillon, fut enlevée à 20 pieds au-dessus et flotta ainsi jusqu'au moment où la pression écrasa le bâtiment. Les cinq habitants de cette maison ont disparu sans laisser aucune trace; on croit qu'ils ont été emportés dans le lac Michi-

gan. Une maison perdit son toit ; ses charpentes et pans de bois sont restés ; mais toute la maçonnerie de brique a été arrachée comme la peau d'une orange. Vingt-huit personnes ont péri à Racine et trente ont été blessées. La nature des blessures était très curieuse : quelques-uns des blessés avait les yeux crevés, d'autres avaient simplement les doigts brisés. »

IV

RELATIONS D'AURORES POLAIRES

« Rien n'est à négliger de ce qui peut entraîner une complète conviction dans la théorie des forces de la nature, et faire passer de l'inquiétude de la recherche à la sécurité de la vérité connue. Serait-on bien sûr, par exemple, de la théorie de l'arc-en-ciel, si, au moyen des gouttes d'eau que l'on fait jaillir soi-même en plein soleil, on n'avait pas reproduit dans toutes ses particularités ce brillant météore? Les expériences de cabinet sont modestes, mais utiles, donc estimables[1]. »

[1] Babinet, *Études et lectures sur les sciences d'observation*, t. I, p. 25; 1855.

Ces lignes de Babinet nous ont encouragé à poursuivre, en 1876, les analogies que nous avions observées entre les effets des courants électriques de haute tension et les grandes manifestations électriques naturelles. Nous avons été conduit ainsi à la théorie exposée précédemment sur les aurores polaires. (§ 87 à § 110, p. 136 à 161.)

L'expérience bien connue de de la Rive sur la rotation des lueurs électriques, produites dans le vide, autour d'un aimant, avait déjà fait ressortir l'origine électrique des aurores polaires et leur liaison avec le magnétisme du globe[1].

Mais il restait à expliquer encore un certain nombre de circonstances qui accompagnent leur apparition.

Dans les expériences que nous avons décrites, l'écoulement du flux électrique se produit au sein de masses humides, comme dans l'atmosphère, et les observations mentionnées plus haut (voir

1 Voir *Traité d'électricité*, par A. de Rive, t. II, p. 248, et t. III. p. 289. Paris, J.-B. Baillière et Fils, 1858.

notes des pages 146, 152 et 158) ainsi que les diverses relations que nous allons citer montrent, en effet, que les masses nuageuses jouent un rôle important dans la production des aurores boréales.

Descriptions d'aurores boréales, et explication du type le plus remarquable des aurores polaires[3].

Alexandre de Humboldt a décrit, comme il suit, les phénomènes des aurores boréales[1] :

« A l'horizon, vers le méridien magnétique du lieu, le ciel, d'abord pur, commence à se rembrunir ; il s'y forme une sorte de *voile nébuleux* qui monte lentement et finit par atteindre une hauteur de 8° ou 10°. A travers *ce segment obscur*, dont la couleur passe du brun au violet, les étoiles se voient comme à travers un épais brouillard. Un arc plus large, mais d'une lumière éclatante, d'a-

[1] *Cosmos*, traduction de MM. Faye et Galuski, 1866-1867, t. I, p. 216.

bord blanc, puis jaune, borde le segment obscur. Quelquefois l'arc lumineux paraît agité, pendant des heures entières, par une sorte d'*effervescence et par un continuel changement de forme* avant de lancer des rayons et des colonnes de lumière qui montent jusqu'au zénith. Plus l'émission de la lumière polaire est intense, et plus vives en sont les couleurs ; elles passent du violet et du blanc bleuâtre au vert et au rouge purpurin. Tantôt les colonnes de lumière paraissent sortir de l'arc brillant, mélangées de rayons noirâtres semblables à une fumée épaisse ; tantôt elles s'élèvent simultanément en différents points de l'horizon, et se réunissent en une *mer de flammes* dont aucune peinture ne saurait rendre la magnificence ; car, à chaque instant, de rapides ondulations en font varier la forme et l'éclat. Autour du point qui répond, dans le ciel, à la direction prolongée de l'aiguille d'inclinaison, les rayons paraissent se rassembler et former *la couronne de l'aurore boréale ;* c'est une espèce de *dais céleste* formé d'une *lumière douce* et paisible. Il est rare que l'apparition soit aussi complète et se

prolonge jusqu'à la formation de la couronne; mais quand celle-ci paraît, elle annonce toujours la fin du phénomène.

« Les rayons deviennent alors plus rares, plus courts et moins vivement colorés. La couronne et les arcs lumineux se dissolvent, et bientôt on ne voit plus sur la voûte céleste que de *larges taches nébuleuses* immobiles, pâles ou d'une *couleur cendrée;* elles ont déjà disparu que les traces du segment obscur, par où l'apparition débuta, persistent encore à l'horizon. Enfin, il ne reste souvent, de ce beau spectacle, qu'un *faible nuage blanchâtre, à bords déchiquetés*, ou divisés en petits amas, comme les *cirro-cumuli.*

« *Cette liaison qui paraît exister entre la lumière polaire et l'apparition d'une certaine espèce de nuages* est confirmée par tous les observateurs; tous ont affirmé que la lumière polaire émettait ses plus vifs rayons, lorsque les *hautes régions de l'air contenaient des amas légers de cirro-strati.*

« Quelquefois *les nuages* se groupent et s'arrangent en plein jour comme les rayons d'une aurore

boréale ; alors *ils paraissent troubler l'aiguille aimantée.* »

Arago a montré, dans sa *Notice sur les aurores boréales*, « que toutes les aurores, voire celles qui ne s'élévent pas au-dessus de notre horizon et dont nous ne connaissons l'existence que par les relations des observateurs placés dans les régions polaires, *altèrent fortement la déclinaison de l'aiguille aimantée, l'inclinaison* et l'*intensité*[1] ».

Pendant deux cent six jours (de septembre 1828 à avril 1839) passés à Bossekop, sur la côte de West-Finmark, par 70° de latitude boréale, Lottin, Bravais, Lilliehook et Siljeström ont observé cent quarante-trois aurores boréales parmi lesquelles il s'en est trouvé soixante-quatre pendant la nuit de soixante-dix journées qui règne dans ces régions.

Le soir, entre 4 et 8 heures, d'après les descriptions faites par M. Lottin[2], la brume légère qui

[1] *Notices scientifiques*, t. I, p. 599.

[2] *Voyages en Scandinavie, en Laponie*, etc.

règne presque habituellement au nord, à la hauteur de 4 à 6°, se colore à sa partie supérieure, ou plutôt se frange des lueurs de l'aurore qui existe derrière. Cette bordure devient plus régulière et forme un *arc vague* d'une couleur jaune pâle, dont les bords sont diffus et dont les extrémités s'appuient sur les terres.

Il se forme des *rayons* qui s'allongent, se raccourcissent lentement ou instantanément ; ils *dardent*, augmentant ou diminuant subitement d'éclat. Tous ils semblent converger vers un même point du ciel, indiqué par la direction de l'aiguille d'inclinaison ; quelquefois ils atteignent ce point de réunion en formant ainsi le fragment d'une immense coupole lumineuse.

L'arc continue de monter vers le zénith ; il éprouve *un mouvement ondulatoire dans sa lueur*, l'éclat de chaque rayon augmentant successivement d'intensité.

Souvent l'arc n'est qu'une longue bande de rayons qui se contourne, se sépare en plusieurs parties, formant des courbes gracieuses qui se

referment presque sur elles-mêmes, et offrent, n'importe dans quelle partie de la voûte céleste, ce que l'on a nommé des *couronnes boréales*.

Les courbes se forment et se déroulent comme les plis et les replis d'un serpent; les rayons se colorent de diverses nuances.

De nouveaux arcs se succèdent à l'horizon; on en a compté jusqu'à neuf; ils se serrent les uns contre les autres, ils pâlissent avant d'avoir atteint l'horizon du sud, deviennent vagues et finissent par se confondre avec les nuages.

Après avoir décrit le mouvement *ondulatoire* des rayons auroraux, Bravais ajoute que les rayons ont aussi un mouvement longitudinal ou vibratile qu'il est bon de noter. « Lorsque le rayon, restant à peu près à la même place, s'allonge rapidement vers le haut ou vers le bas, nous disons qu'il *darde*... Lorsque le rayon s'abaisse et remonte alternativement sans que sa longueur change d'une manière notable, nous disons qu'il *joue* ou *danse*. C'est un accident des plus fréquents, et l'un de ceux

qui caractérisent le mieux les aurores boréales. Ces rayons jouant et dansant sont les *capræ saltantes* des anciens auteurs, les *marionnettes* des habitants de Terre-Neuve et du Canada, les *merry dancers* des Anglais.

« Ces mouvements sont souvent accompagnés de changements correspondants dans l'éclat des rayons; en général, plus les mouvements sont rapides et plus les rayons deviennent brillants. D'autres fois enfin, les rayons paraissent et disparaissent alternativement à la même place sans changer sensiblement de forme ou de grandeur[1]. »

M. Siljeström a fait l'observation suivante au sujet des aurores boréales de Bossékop :

« Une circonstance me paraît très digne d'attention... Si les lueurs restaient quelque temps au-dessus de l'horizon, il y avait toujours au-dessous d'elles *un espace noir* sur lequel elles reposaient ou duquel elles paraissaient provenir..

[1] *Voyages en Scandinavie et Laponie*, etc., p. 501.

« Les lueurs détachées semblaient aussi émaner de semblables *espaces noirs*, et souvent je voyais *des colonnes de lumière entre deux espaces noirs superposés l'un à l'autre*...

« J'observai très souvent que, l'aurore ayant émané, quelque temps auparavant, d'une semblable tache noire, celle-ci diminua peu à peu, ou même disparut tout à fait, et que l'aurore déclina dans la même proportion.

« D'après l'apparence de ces *taches noires*, il me paraît évident qu'elles étaient réellement formées *de vapeurs* fort éloignées, mais très fines, puisque j'observai quelquefois des étoiles au travers d'elles [1].»

Dans une importante étude sur les aurores polaires [1], M. Angot a fait ressortir l'importance que jouent les nuages dans la production des aurores boréales :

[1] *Voyages en Scandinavie*, etc., p. 558.

[2] Alfred Angot, *Les aurores polaires*. (Voir *la Lumière électrique*, dix articles du 21 octobre au 23 décembre, 1882.)

« Non seulement les bandes nuageuses ont une grande analogie de forme et de position avec certaines aurores polaires, mais il semble y avoir dans certains cas la plus étroite connexion entre les deux phénomènes. Tantôt, quand l'aurore polaire disparaît le matin devant la clarté du jour, on la trouve remplacée dans le ciel par des bandes de cirro-stratus ; plus souvent encore ce sont ces nuages qui se montrent d'abord dans la journée, et la nuit suivante, on aperçoit les rayons de l'aurore. Weber et M. H. Fritz [1] ont constaté ainsi que toutes les fois qu'ils observaient les bandes nuageuses pendant le jour, il y avait, la nuit suivante, quelque manifestation aurorale.

« Depuis Frobesius, qui indiquait déjà certaines de ces relations en 1739, un grand nombre d'observateurs, Richardson, sir John Franklin, Wrangel, Winnecke, Hildebrandsson, etc., ont cité de nombreux et curieux exemples de cette analogie des deux phénomènes, analogie si complète que

1 Hermann Fritz, de Zurich, *Das Polarlicht*, 1881.

Winnecke n'hésitait pas à considérer *les cirro-stratus comme les véhicules mêmes des lueurs aurorales.*

« Dans ses observations prolongées sur les aurores boréales, Weyprecht est arrivé à des conclusions identiques. D'après lui les phénomènes lumineux de l'aurore sont tels que la lumière semble liée intimement à des particules matérielles. En effet, partout où plusieurs rayons se croisent, l'intensité de la lumière augmente; il en est de même là où une bande aurorale semble faire un pli; de plus, on dirait que le vent agit sur l'aurore qui paraît comme déchirée après les tempêtes. Enfin *la présence des nuages semble favoriser le développement des aurores boréales.* »

Dans son ouvrage sur l'aurore boréale [1], M. S. Lemström a donné les belles descriptions suivantes des aurores qu'il a observées lui-même pendant ses voyages dans les régions septentrionales :

[1] S. Lemström, *L'Aurore boréale*, p. 8 et suiv. Paris, Gauthier-Villars, 1886. Voir aussi *Science et Nature*, t. IV, nº 103, p. 376. Paris, 1885.

« Le 15 octobre 1868, le bateau à vapeur suédois *Sophia*, revenant du Spitzberg, se trouvait devant l'île déserte Beeren Eiland. Un vent d'est terrible, une vraie tempête, soulevait la mer dont les vagues immenses, se brisant contre un banc sous-marin, venaient par intervalles inonder le pont du navire, en y laissant des couches d'eau immédiatement glacées.

« La mer agitée présentait un spectacle admirable pendant le court crépuscule qui, dans l'automne de ces contrées, remplace le jour. Mais la scène prit un caractère encore plus imposant pendant la nuit éclairée par les lueurs vacillantes et mystérieuses de l'aurore boréale.

« Un peu avant minuit, *un nuage noir* [1] se leva à l'horizon, en s'étendant sur un ciel bleu foncé où brillaient les étoiles couvertes çà et là d'un léger voile.

« Le nuage étant environ à 60° au-dessus de

1 Nous indiquons en *italiques* les passages de ces descriptions qu nous paraissent mériter une attention particulière au point de vue du mode de production des aurores.

l'horizon, *ses bords commencèrent à s'éclairer d'une lueur jaunâtre,* et bientôt *il en jaillit des jets lumineux* d'un violet rougeâtre irisés de nuances jaunes et vertes. Près du zénith, les rayons formèrent une admirable *corona borealis* qui malheureusement disparut presque aussitôt.

« Durant le phénomène, une lueur magique éclaira tout à coup la mer et nous pûmes un instant apercevoir les vagues mugissantes dont les sommets argentés d'écume se heurtaient contre le navire avec un bruit étourdissant, accompagné d'un chant formidable produit par la tempête dans les cordages du navire. Aussitôt après, la lumière disparut, et l'obscurité nous enveloppa plus profonde et plus sinistre qu'auparavant. »

« Le 18 octobre 1868, le même navire s'approchait des côtes de la Norvège par un vent qui devint contraire au dernier moment.

« A l'ouest de l'horizon, nous remarquâmes alors *deux couches de nuages,* que séparait nettement une bande bleue du ciel, croisée par une

bande striée d'un jaune pâle. C'était le faible commencement d'une aurore boréale dont la splendeur devait bientôt surpasser tous les phénomènes du même genre que nous avions observés jusqu'alors pendant le voyage.

« *Les bords de la couche supérieure des nuages s'éclairèrent peu à peu*, et bientôt nous en vîmes sortir des *flammes isolées* qui parfois montaient jusqu'au zénith. Subitement le phénomène embrassa tout l'horizon. *Partout des flammes, partout des jets d'étincelante lumière*, jaunes dans le bas, verts au milieu et rouge violet à l'extrémité supérieure. En un instant, tous les rayons se réunirent en une *couronne régulière et éblouissante* qui se dessina sur le ciel au sud du zénith.

« Quand le phénomène fut arrivé à son maximum d'intensité, il nous fit l'effet de la voûte immense d'un temple au milieu de laquelle brillait *un lustre splendide*.

« L'apparition ne dura que quelques minutes, mais en s'effaçant, elle laissa encore après elle *une zone lumineuse entre les couches de nuages*. De la cou-

che supérieure continuèrent à s'élancer, à de courts intervalles, des rayons isolés qui montaient jusqu'au zénith et y formaient les fragments d'une couronne. Les bords des couches des nuages restèrent lumineux alors même que les rayons eurent disparu. »

La description qui précède est accompagnée, dans l'ouvrage de M. Lemström, d'une planche chromolithographique représentant cette magnifique aurore boréale. La figure 46 en donne une faible idée [1].

Une telle apparence serait absolument inexplicable, si nous n'en trouvions l'analogue parmi les phénomènes que nous avons observés, en 1877 [2], lors de l'écoulement d'un flux électrique de haute tension à la surface d'une masse liquide.

1 M. Lemström fait observer que la planche ne reproduit que la demi-partie de l'horizon, et que lecteur devra se représenter, par la pensée, l'autre partie qui manque.

2 *Comptes rendus*, 1er octobre 1877, et *Recherches sur l'électricité*, 1879, § 138.

Pouillet écrivait, en 1856, dans son *Traité de physique et de météorologie* : « Le phénomène des aurores boréales paraît être le plus magnifique, le plus imposant, le plus resplendissant de ceux qui puissent s'offrir à nos regards et, en même temps, le plus compliqué, le plus inextricable, le plus insaisissable de ceux qui s'offrent à nos recherches... Ce serait le désespoir de la science, si la science pouvait se désespérer, mais, tous les jours, elle apprend qu'il y a entre les phénomènes naturels des liens de subordination nécessaires... Peut-être un simple fait, jusqu'à ce jour inaperçu, suffira-t-il pour lever le voile qui nous cache depuis si longtemps tous les mystères de l'aurore boréale. »

Nous croyons donc pouvoir rapprocher du beau phénomène naturel représenté figure 46 les effets lumineux produits au point de rencontre d'un puissant flux électrique et d'une couche d'eau distillée (fig. 47 et fig. 48).

La différence d'échelle entre ces phénomènes est

telle qu'il semble téméraire d'oser les comparer [1]. Mais si on agrandit, à l'aide d'une lunette ou même d'une simple loupe, le phénomène produit dans

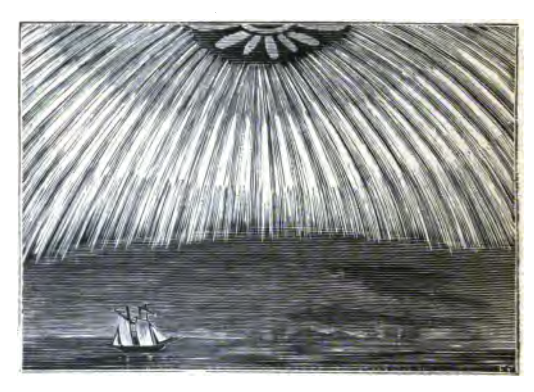


FIG. 46. — Aurore boréale, avec couronne et coupole lumineuse, observée en mer, par M. S. Lemstrom, près des côtes de la Norvège, le 18 octobre 1868.

l'expérience de cabinet, on est également témoin

Il est toujours difficile pour l'esprit d'admettre une analogie entre des effets de grandeurs très différentes. Quand on a comparé, pour la première fois, la lumière et le bruit de la faible étincelle électrique, provenant d'un bâton de verre frotté, à l'éclair et au tonnerre, ce rapprochement a paru inadmissible.

Il est regrettable, a dit Peltier, qu'on ait méconnu si longtemps

d'un beau spectacle, et les effets qu'on observe sont tout à fait analogues à ceux de l'aurore polaire appartenant au type remarquable décrit par M. Lemström[1].




Fig. 47 et 48. — Figures lumineuses produites à la surface de l'eau distillée, par l'écoulement d'un flux électrique de haute tension. (Ces figures sont renversées, telles qu'elles seraient vues dans une lunette astronomique.)

On y retrouve, en effet, les *rais*, formant une

cette analogie; il en est résulté un grand retard dans l'application des lois de l'électricité statique aux effets connus de certains météores.

[1] Nous n'avons pas agrandi dans les figures 47 et 48 les phénomènes observés dans nos expériences. Ils sont représentés de grandeur naturelle, mais renversés, tels qu'on les verrait dans une lunette astronomique, et la couche d'eau distillée paraît occuper ainsi la partie supérieure.

Dans l'assimilation de ces figures à celles des aurores, nous n'en-

sorte de roue, et illuminés d'une *lumière douce et paisible de couleur bleu cendré*, comme celle qui est signalée dans les descriptions d'aurores boréales, et qu'on remarque également dans la figure chromolithographiée de M. Lemström.

Ces rais et les points lumineux qui les forment par leur mouvement de va-et-vient, changent continuellement de place et de courbure, et semblent *jouer* comme des *feux follets;* les images qu'ils offrent se succèdent à l'instar de celles d'un kaléidoscope. Finalement, ils donnent naissance à des

tendons pas que la terre corresponde à l'électrode métallique d'où émane le flux d'électricité. Ainsi que nous l'avons exposé, § 100, p. 149, nous considérons les aurores comme résultant de l'écoulement de l'électricité accumulée dans les régions élevées de l'atmosphère vers des régions plus élevées encore, et produites à la rencontre des nuages glacés qui s'y trouvent. Nous ne pouvons imiter cet écoulement d'électricité qu'à l'aide d'un conducteur métallique qui représente les masses électrisées de l'atmosphère, mais non la terre elle-même. Faute de pouvoir disposer de vastes couches d'air électrisées comme celles de la nature, on est obligé de se contenter de cette approximation, de même que dans l'imitation des phénomènes ordinaires de la foudre, à l'aide des machines à électricité statique, on n'obtient des étincelles semblables aux éclairs, qu'en les faisant artir de conducteurs métalliques. L'analogie des effets lumineux oduits n'en est pas moins complète.

cercles lumineux ou à des couronnes, soit simples, soit doubles et concentriques[1].

On retrouve ainsi le jeu des rayons des aurores, et le globe ovoïde, de couleur jaune pâle, formé par les innombrables filets lumineux, dont *les pieds* sont constamment agités et produisent les figures ci-dessus, peut être assimilé lui-même, malgré l'exiguïté des proportions, à la *coupole* des aurores, de même que les couronnes lumineuses paraissent correspondre aux *couronnes boréales*.

Toutes les aurores n'ont pas, comme on l'a vu par les descriptions citées, cette apparence de coupole et de couronnes boréales complètes. Les plus communes sont celles qui se présentent sous la forme d'arcs, frangés de rayons brillants, animés d'un mouvement ondulatoire, et nous avons décrit plus haut (voir pages 138 et 139) les phénomènes qui leur sont analogues.

La lumière des aurores a, du reste, été déjà com-

1 Nous avons déjà mentionné plus haut quelques-uns de ces effets, à l'occasion de l'étude de la foudre globulaire qui résulte également d'un abondant écoulement local d'électricité. (§ 4, p. 17 et 18.)

parée à celle de l'arc voltaïque. MM. Becquerel ont écrit, à ce sujet, dans leur *Traité d'électricité et de magnétisme :*

« On ne peut s'empêcher de reconnaître que les rayons ou colonnes des aurores polaires, obéissant à l'action du magnétisme terrestre, ont de l'analogie avec les jets lumineux produits dans l'expérience de Davy, lorsqu'on fait passer dans le vide, entre deux pointes de charbon, la décharge d'une forte batterie voltaïque. Il pourrait donc se faire que les rayons lumineux de l'aurore fussent des traînées de matières gazeuses, transportées par l'électricité et capables de prendre toutes les formes, mais avec cette condition toutefois, que les recompositions se fissent perpendiculairement à l'aiguille d'inclinaison[1]. »

Il reste néanmoins à fournir un critérium important, sur lequel M. Piazzi Smyth a bien voulu appeler depuis longtemps notre attention[2], ainsi que

1 Becquerel et Edmond Becquerel, *Traité d'électricité et de magnétisme*, t. I, p. 447. Paris, F. Didot, 1855.

2 Par une lettre, datée du 23 novembre 1876.

celle de MM. Warren de la Rue et Hugo W. Müller[1] qui, de leur côté, ont signalé, en 1880, des analogies importantes entre les effets de la décharge de leur pile de 11 000 éléments et les aurores boréales[2].

Ce critérium consisterait à rechercher si le spectre de la lumière jaune pâle produite dans nos expériences, présente la raie jaune-citron d'Angström, qui caractérise le spectre de la lumière des aurores polaires.

Cette expérience est délicate et difficile, d'une part, à cause de la durée limitée de la décharge de nos batteries secondaires qui ne permet pas une observation très longtemps prolongée, et d'autre part, à cause du trouble que peut apporter dans

1 Piazzi Smyth, *Sur une expérience indispensable à faire au sujet des aurores polaires.* (*Nature* anglaise, 27 mai 1880, t. XXII, p. 76.)

2 Dans un très intéressant mémoire sur ce sujet, lu à la Société royale de Londres, MM. de la Rue et Müller ont conclu de leurs expériences que les couleurs si variées des aurores polaires pouvaient s'expliquer par le degré plus ou moins grand de raréfaction de la région de l'atmosphère dans laquelle elles se produisent, et qu'on pouvait même ainsi, d'après ces couleurs, se faire une idée approximative de la hauteur des aurores. (*Nature* anglaise, 13 mai 1880, t. XXII, p. 33.)

les observations la lumière provenant du métal formant l'électrode. Sans doute, on pourrait employer comme nous l'avons déjà fait, une électrode non métallique, formée soit de papier humecté d'eau distillée, soit d'amiante humide ; mais dans ce cas, le papier tendant à se carboniser et l'amiante pouvant donner, par sa fusion partielle, la lumière que nous avons qualifié d'*électrosilicique*, peuvent rendre difficile l'observation du spectre de la lumière due au simple passage de la décharge au travers de l'air humide.

Quoi qu'il en soit, nous ne perdons pas de vue ce desideratum, et nous poursuivrons cette recherche, dès que cela nous sera possible, de même que nous serons heureux de la voir réaliser par ceux qui ont aujourd'hui à leur disposition des machines dynamo-électriques pouvant donner un courant voltaïque prolongé de haute tension.

Parmi les aurores en forme de coupole lumineuse, nous signalerons encore l'une des six aurores observées par M. Piazzi Smyth à Édimbourg,

et représentées par des planches chromolithographiées dans le quatorzième volume des *Annales de l'Observatoire royal d'Édimbourg* (pl. V, VI et VII). Les cinq autres aurores sont formées d'arcs simples ou multiples frangés de rayons brillants.

Les aurores polaires se produisent quelquefois à des hauteurs si grandes dans l'atmosphère qu'elles peuvent être vues dans des lieux très éloignés des pôles. Plusieurs aurores remarquables ont été observées en Angleterre, en France, etc., et décrites par MM. Rand Capron[1], Camille Flammarion[2], Amédée Guillemin[3], etc.

Exemple dune forme bizarre d'aurore boréale.

M. Lemström a signalé encore[4] « une aurore

1 *Auroræ, their characters and spectra*, par G. Rand Capron. Londres, Spon, 1880.

2 Camille Flammarion, *L'Atmosphère*, p. 769. Paris, Hachette, 1874.

3 Amédée Guillemin. *Le Monde physique*, p. 107. Paris, Hachette, 1883.

S. Lemström, *L'Aurore boréale*, p. 10, p. III.

boréale *de forme bizarre*, observée au presbytère d'Enare, le 16 novembre 1871. Cette fois, le phénomène a pris la forme d'un voile rouge *replié en*



Fig. 49. — Aurore boréale en forme de boucle, observée par M. S. Lemström.

bucole, dont la convexité se trouvait au zénith, tandis que les deux extrémités du voile, tirant légèrement sur le jaune et le vert, ondoyaient vers l'est et l'ouest. »

En reproduisant les contours de cette aurore

(fig. 49), d'après la planche de l'ouvrage de M. Lemström, nous ferons remarquer sa ressemblance avec l'éclair replié sur lui-même en forme de *folium* de Descartes, que nous avons observé



Fig. 50. — Éclair en forme de *folium* de Descartes, observé, des hauteurs de Meudon, pendant un orage sur Paris, le 18 août 1876.

pendant l'orage du 18 août 1876 (voir § 32, p. 61) et signalé en même temps que les éclairs *en chapelet*[1]. Nous représentons ici (fig. 50) la forme de cet éclair[2].

1 *Recherches sur l'électricité*, 1879, § 188.

2 On a vu aussi des éclairs en forme de *lemniscate*. — M. J. Lawrence

Ainsi les éclairs des orages ordinaires et les jets lumineux des aurores boréales peuvent avoir quelquefois des analogies de forme remarquables. Il en résulte donc une présomption de plus en faveur de la nature électrique des aurores polaires.

Exemples du bruissement qui accompagne quelquefois les aurores polaires.

Le *bruissement* qu'on a signalé quelquefois lors de l'apparition des aurores boréales a été l'objet des observations suivantes :

« Des personnes de diverses conditions et états, et habitant des districts très éloignés dans les îles Shetland, ont été unanimes à dire que lorsque l'aurore boréale est forte, elle est accompagnée

comme nous l'avons mentionné (p. 75) en a signalé un en forme de 8 presque parfait.

L'un des éclairs en spirale observés et photographiés par M. Ch. Moussette (*Comptes rendus*, 5 juillet 1886) s'est trouvé également replié sur lui-même en forme de 8.

d'un *bruit* qu'ils ont tous comparé à celui d'un van lorsqu'on vanne le blé [1]. »

« A Rochester, pendant les aurores d'août 1827, on a entendu, dit-on, distinctivement des détonations semblables à celles qui résultent de la décharge d'une batterie électrique. L'observateur du comté de Saint-Laurent assure aussi avoir entendu des détonations du même genre, pendant que les colonnes lumineuses étaient le plus agitées. Les physiciens de New-Haven et du collège de Yale parlent également du bruit que faisait l'aurore [2]. »

Exemples d'aurores polaires accompagnées de perturbations magnétiques d'une grande intensité.

Nous mentionnerons encore l'exemple suivant d'aurores boréales, accompagnées de fortes pertur-

1 Extrait d'une communication faite à Arago, par Necker de Saussure après avoir observé des aurores boréales en Ecosse de 1839 à 1840. (Arago, *Notices scientifiques.)*

2 *American Journal of science,* avril 1828, et Arago, *Notices scientifiques,* t. I, p. 633.

bations magnétiques, d'après un mémoire de M. Th. Moureaux, publié dans l'*Annuaire de la Société météorologique de France*[1].

Au mois de novembre 1882, des *aurores boréales d'un éclat et d'une étendue extraordinaires* ont été observées; celle du 17 novembre notamment a été vue jusque dans des régions situées au-dessus du vingt-septième parallèle.

Elles ont occasionné des perturbations magnétiques d'une extrême violence dans presque toutes les régions du globe.

Une *tempête électrique* a été ressentie à l'ouest de Chicago. Le courant qui parcourait les fils télégraphiques (et qui devait résulter sans doute d'un puissant effet d'influence de l'atmosphère fortement électrisée)[2] était tel que, dans les bureaux des télégraphes de Chicago et d'autres villes, le

1 31e année, juin 1883, p. 184.

2 « Il paraît bien demontré », dit M. Mascart, « qu'il existe dans les régions supérieures de l'atmosphère des masses électriques considérables, comme l'indique encore le phénomène des aurores boréales qui paraissent être des lueurs électriques dans l'air raréfié à une très grande hauteur. » (*Traité d'électricité statique*, t. II, p. 579; Paris, Masson, 1876.)

feu s'est déclaré dans les appareils de réception et que des parties métalliques de ces appareils ont été fondues. A Milwaukee, l'intensité du courant suffisait à alimenter une lampe électrique.

Les aurores boréales produites en même temps ont été vues en France le long de la côte de la Manche, dans les départements du Nord et dans la région basse du bassin du Rhône. En Angleterre, à l'Observatoire de Greenwich, un arc d'un grand éclat s'est manifesté, accompagné de rayons brillants qui s'en échappaient de toutes parts et s'élevaient jusqu'au zénith.

M. Piazzi Smyth a pu observer l'aurore à Édimbourg ; vers minuit, le phénomène atteignait sa plus grande intensité ; les rayons semblaient tous monochromes, couleur jaune-citron, et la plupart avaient la forme de jets rectilignes projetés à 15 ou 20° de hauteur.

Ces phénomènes ont coïncidé avec l'apparition sur le soleil de taches nombreuses et de grande étendue.

Exemple d'aurore électrique produite dans une région très éloignée des pôles.

Nous citerons, en terminant, un exemple d'aurore électrique tout à fait locale, produite loin des régions polaires, et se rapprochant des phénomènes déjà observés par M. Piazzi Smyth à Madère. Cet exemple semble de nature à confirmer les vues que nous avons exposées plus haut (§ 104, p. 154).

« Le 28 novembre 1886, d'après M. P. E. Schmitz, une aurore boréale a été observée à Funchal, île de Madère [1].

« La nuit avait été orageuse et dans la matinée, après 6 heures, l'orage recommençait. Mais les éclairs étaient bien différents des éclairs ordinaires. A l'horizon, limité par de hautes montagnes, dans la direction du nord, apparut un *demi-cercle lumineux* de petit diamètre, émettant une lumière

1 552e bulletin météorologique du journal *la Nature*, et *Annuaire de la Société météréologiqne*, mars 1887, p. 135.

blanchâtre assez fixe ; ce demi-cercle s'élargit rapidement d'une manière continue, mais par secousses, jusqu'à couvrir la moitié de la voûte du ciel. Peu d'instants après, il se rétrécit de la même façon. La durée du phénomène fut très courte. »

FIN

TABLE DES FIGURES

TABLE DES MATIÈRES

LYON. — IMPRIMERIE PITRAT AINÉ, 4, RUE GENTIL

OUVRAGE DU MÊME AUTEUR

A la même Librairie.

RECHERCHES SUR L'ÉLECTRICITÉ

DEUXIÈME ÉDITION

1 volume in-8, cartonné à l'anglaise, avec 89 figures dans le texte.

Prix : 6 francs.

Cet ouvrage renferme les principaux résultats des recherches présentées par M. Gaston Planté à l'Académie des sciences, depuis 1859, et qui lui ont valu le prix Lacaze pour la physique, ainsi que la grande médaille d'Ampère de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale.

L'ouvrage est divisé en six parties :

La *première partie* comprend la description des appareils et des expériences que M. Planté a fait connaître pour *accumuler* ou *transformer* à l'aide des courants secondaires, l'énergie de la pile voltaïque.

L'auteur y montre comment il a été conduit, en 1860, à l'invention de l'appareil qu'il a désigné sous le nom d'*accumulateur*, jouissant de la propriété remarquable d'*emmagasiner* l'électricité voltaïque, et dont on a fait de si nombreuses applications dans ces dernières années.

La *seconde partie* contient l'exposé des applications que l'auteur avait lui-même signalées ou déjà réalisées.

Dans la *troisième partie*, l'auteur décrit les nombreux phénomènes qu'il a observés avec des courants électriques de haute tension, obtenus à l'aide de ses appareils.

La *quatrième partie* traite des analogies de ces phénomènes avec les grands phénomènes électriques naturels.

La *cinquième partie* renferme la description et l'étude des effets d'un nouvel appareil, à l'aide duquel l'auteur est parvenu à transformer directement l'électricité dynamique en électricité statique, et qu'il a désigné sous le nom de *machine rhéostatique*.

La *sixième partie* est consacrée à l'énumération des analogies des phénomènes produits par des courants électriques de haute tension avec les effets produits par des actions mécaniques, et à l'exposé des conséquences que l'auteur en a tirées sur la nature de l'électricité.

« Les *Recherches sur l'électricité* de M. Gaston Planté sont un modèle pour la clarté du style et l'élégance de l'exposition. » (JOSEF KAREIS, *Zeitschrift für Elektrotechnik.)*

« On ne peut qu'admirer la beauté et l'originalité des expériences décrites dans cet ouvrage, et reconnaître la très haute valeur des résultats obtenus par M. Gaston Planté. Il serait à souhaiter que tous les traités de science expérimentale fussent écrits dans un style aussi clair, aussi concis et aussi élégant que celui de l'auteur. » (Prof. SILVANUS P. THOMPSON, *Nature* anglaise.)

Cet ouvrage a été traduit en allemand par M. le Dr Wallentin (Vienne, 1886), et en anglais par M. P. Bedford Elwell (Londres, 1887).

TRAITÉ EXPÉRIMENTAL

D'ÉLECTRICITÉ

ET DE MAGNÉTISME

PAR

J.-E.-H. GORDON
Secrétaire adjoint de *The British Association*

TRADUIT DE L'ANGLAIS ET ANNOTÉ

Par M. J. RAYNAUD
Docteur ès sciences, professeur à l'École supérieure de télégraphie

Avec le concours de M. SELIGMANN-LUI, ingénieur des télégraphes

PRÉCÉDÉ D'UNE INTRODUCTION

Par M. A. CORNU
Membre de l'Institut (Académie des sciences),
Professeur de physique à l'École polytechnique.

2 volumes in-8, de 700 pages chacun, avec 58 planches et 371 figures.

Ouvrage complet : 35 francs.

Les phénomènes rapportés à l'électricité peuvent être envisagés à tant de points de vue, qu'on ne saurait s'étonner de la diversité des formes sous laquelle l'exposition de cette branche si importante de la physique peut être présentée. Les progrès accomplis en Angleterre dans ces dernières années à l'occasion des grands travaux de télégraphie sous-marine ont modifié profondément l'état de la science telle qu'elle est exposée dans les anciens traités, d'ailleurs fort estimés, publiés en France, et ont naturellement appelé l'attention sur les publications anglaises relatives à l'enseignement de l'électricité; ces publications sont nombreuses et présentent, pour la plupart, ce carac-

tère spécial de donner à la fois la description détaillée des procédés expérimentaux usités dans la pratique télégraphique, et les aperçus les plus élevés sur la science de l'énergie avec toutes les conséquences qui en découlent, en particuler l'emploi courant des unités abolues dans la mesure des phénomènes. C'est qu'en Angleterre beaucoup de progrès récents de la science électrique ont été accomplis en quelque sorte sous la pression des événements, par des savants apportant les ressources les plus puissantes de l'analyse mathématique à la solution des problèmes industriels : de là cette union permanente et d'ailleurs très féconde d'idées théoriques générales à la préoccupation toujours présente de problèmes pratiques : de là aussi le double caractère imprimé à l'enseignement.

Le présent traité se recommande au public français comme donnant une idée de ce mode d'enseignement qui plaît en général aussi bien par ses côtés précis que par ses aspects pratiques : l'auteur, M. Gordon, disciple du savant et regretté professeur Clerk Maxwell, a cherché à reproduire sous une forme élémentaire les leçons du maître, en adoptant une méthode d'exposition purement expérimentale, mais tout en conservant l'esprit élevé qui doit régner désormais dans cette branche de la science.

Le lecteur français trouvera à ce livre une physionomie originale, je serais tenté de dire une saveur particulière; il y verra représenté fidèlement le caractère de l'expérimentation anglaise, par la description détaillée des méthodes ou des appareils les plus usités : ainsi il y trouvera le résumé des travaux du comité de l'Association Britannique, la description de quelques-uns des instruments les plus intéressants des laboratoires de l'Université de Cambridge, de Glasgow, ou des belles instal-

lations de MM. Warren de la Rue et Spottiswoode; l'observatoire magnétique de Kew, etc.

Le livre de M. Gordon a eu la bonne fortune de trouver comme traducteur et annotateur M. Raynaud, professeur à l'École supérieure de télégraphie, si versé dans toutes les questions théoriques et pratiques relatives à l'électricité. M. Raynaud a bien voulu se charger de compléter le livre et de l'ajuster aux exigences de l'enseignement de notre pays, dont les tendances diffèrent sous beaucoup de rapports de celles qui règnent dans l'ouvrage anglais : le texte de l'ouvrage ayant été scrupuleusement respecté, c'est par des appendices que les compléments ont été ajoutés. La plupart des chapitres présentent des additions nombreuses, comprenant d'abord le résumé, au point de vue français, des mémoires, ou la description des appareils, qui, dans l'édition primitive, s'adressaient surtout au lecteur anglais; ensuite, les extraits des travaux français ou étrangers, destinés à préciser les sujets traités; enfin, l'exposé succint des principales formules relatives à l'application des lois physiques à la mesure des phénomènes. A ce point de vue on doit citer les appendices qui résument les définitions et les formules relatives à l'électrostatique dans ses rapports avec la thermo-dynamique, au magnétisme, aux lois de Ohm et à l'électro-dynamique, et les regarder comme les additions les plus importantes à l'ouvrage anglais; additions d'autant plus utiles que ces développements ne figurent jusqu'à présent dans aucun traité publié en France.

Enfin, plusieurs chapitre ont été fort étendus pour y introduire les travaux les plus récents sur les *décharges électriques dans le vide*, sur la *production de la lumière électrique* par les machines d'induction, sur la *téléphonie*, la *photophonie*; ques-

tions qui ont le privilège d'attirer aujourd'hui avec tant de force l'attention des gens du monde et des savants.

En résumé l'édition française du *Traité d'électricité et de magnétisme* de M. Gordon paraît destinée à exercer dans l'enseignement de l'électricité en France une influence salutaire ; non seulement dans l'enseignement élémentaire par la forme attrayante sous laquelle les phénomènes sont présentés, mais jusque dans l'enseignement supérieur, par les notes dont le traducteur l'a enrichie.

Enfin, elle est digne de l'attention des savants par l'abondance des documents et le soin avec lequel les découvertes les plus récentes ont été exposées.

A. CORNU,
Membre de l'Institut (Académie des sciences).

WUNDT, Traité élémentaire de physique médicale, par le Dr W. WUNDT, professeur à l'Université de Heidelberg. Traduit avec de nombreuses additions, par le Dr Ferdinand MONOYER, professeur de physique médicale à la Faculté de médecine de Lyon. 2e édition, revue, avec additions nouvelles, par le docteur A. IMBERT, professeur de physique à l'École de pharmacie de Montpellier. Paris, 1884, 1 vol. in-8, xx-796 pages, avec 472 fig., y compris 1 pl. en chromolithographie. . . . . . . 12 »

On trouvera réunis dans cet ouvrage la démonstration des lois physiques et la description des instruments qui les vérifient, l'exposé des caractères de corps et les procédés de préparation en usage dans les laboratoires. Toutes ces notions indispensables au médecin et au pharmacien s'y trouvent réunies sous une forme claire et concise.

M. le professeur Monoyer, grâce à son expérience, a su donner à l'ouvrage le plus haut degré d'utilité pratique. Ses nombreuses et importantes additions on fait de la traduction française une œuvre vraiment originale.

M. Imbert a mis cette deuxième édition au niveau de la science moderne.

LYON. — IMPRIMERIE PITRAT AINÉ, RUE GENTIL, 4.



